

ივანე ჯავახიშვილის სახელობის
თბილისის სახელმწიფო უნივერსიტეტი



ზუსტ და საბუნებისმეტყველო მეცნიერებათა ფაკულტეტი

ზურაბ გოგოლაძე

სამაგისტრო ნაშრომი

მსუბუქი ბირთვების წარმოქმნის შესწავლა მეტეორიტების კვლევის
მას-სპექტრომეტრული ანალიზის საშუალებით

ხელმძღვანელი: ფიზ. აკად.დოქტორი
ბითვული ფიზიკის სასწავლო-სამეცნიერო
ლაბორატორიის გამგე ნუგზარ გუბაძე

თბილისი - 2016

ანოტაცია

სხვადასხვა ნიმუშებში ელემენტების იზოტოპური შემადგენლობის შესწავლა, გასული საუკუნიდან დღემდე წარმოადგენს კვლევის ერთ-ერთ აქტუალურ მეთოდს, როგორც ბირთვული მიკროანალიზის სფეროში, ამასთანავე საბუნებისმეტყველო მეცნიერებების სხვადასხვა დარგებში. ამ მხრივ მეტეორიტების შესწავლას განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს, რადგან ის არის არამიწიერი წარმოშობის ერთ-ერთი ობიექტი, რომელზე დაკვირვებაც შესაძლებელია უშუალოდ ლაბორატორიებში და მასთან არის დაკავშირებული ბირთვული ფიზიკის ისეთი საკითხები, როგორცაა ელემენტების წარმოქმნა, მათი ასაკი და გენეზისი.

მოცემული სამაგისტრო ნაშრომის მიზანია მსუბუქი ბირთვების ელემენტების, კერძოდ ${}^7_3\text{Li}/{}^6_3\text{Li}$, ${}^{11}_5\text{B}/{}^{10}_5\text{B}$ იზოტოპური ფარდობების ანალიზის საშუალებით ნუკლეოსინთეზის თეორიაში X-პროცესებისათვის მსუბუქი ბირთვების წარმოქმნის მოდელის შემოწმება. კვლევის ობიექტს წარმოადგენს სხვადასხვა ტიპის მეტეორიტები, რომელთა ანალიზი ხდება $10^{-10} - 10^{-11}$ გრამი ფრაგმენტაციის დონეზე. ექსპერიმენტი ჩატარდა თსუ - ს ბირთვული ფიზიკის ლაბორატორიაში არსებული ორმაგი ფოკუსირების მქონე მას-სპექტრომეტრზე, ლაზერლ-იონური წყაროთი, რომელშიც იონების რეგისტრირება ხდება ფოტომულსიური მეთოდით. ჩვენს მიერ შესწავლილ მეტეორიტის ნიმუშებში ${}^{11}\text{B}/{}^{10}\text{B}$ და ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$ იზოტოპური ფარდობების მნიშვნელობანი ცვლილება არ დაიმზირება, მაგრამ აღმოჩნდა მრავლობითი იზოტოპური ანომალიები სხვადასხვა მასების ელემენტებისათვის, რომელთა შორის აღსანიშნავია Ti - ის და O - ის ბირთვები: ${}^{48}\text{Ti}$, ${}^{49}\text{Ti}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{17}\text{O}$, და ${}^{18}\text{O}$.

Abstract

Studying of isotopic composition of elements in various samples is one of the actual methods of research since the last century till now, as in the sphere of nuclear microanalysis, as in various field of natural sciences. Therein, studying of meteorites has a spacial significance, because it is the only object of cosmic origin, observation on which is possible directly in laboratories and issues of physics are related to it, such as generating of elements, their age and stage of development, generating of meteorities and their age.

The aim of given master's thesis is to control sample of Li and B generating for X-processes in Nucleosynthesis theory, privately by defining ${}^7_3\text{Li} / {}^6_3\text{Li}$, ${}^{11}_5\text{B} / {}^{10}_5\text{B}$ isotopic ratio. Varoius type of meteorites are the object of research, analyze of which is done on $10^{-10} - 10^{-11}$ gram fragmentation level. Instrument of analysize is double focused Mass-spectrometer, with laser-ionic source, existing in nuclear physics laboratory of TSU, in which registering of ions is done with photoemulsion types. In the meteorities studied the significant variations of ${}^{11}\text{B}/{}^{10}\text{B}$ and ${}^7\text{Li}/{}^6\text{Li}$ isotopee ratios wasn't observed. However, samples form meteorities Showed numerous isotope anomalies different mass elements, particularly for the Ti and O isotopes: ${}^{48}\text{Ti}$, ${}^{49}\text{Ti}$, ${}^{16}\text{O}$, ${}^{17}\text{O}$, and ${}^{18}\text{O}$.

სარჩევი

ანოტაცია (Abstract).....	2
შესავალი.....	5
თავი 1. 1.1 ელემენტთა ნუკლეოსინთეზი თერმოობირთვულ რეაქციებში.....	6
1.2 სხვადასხვა ელემენტების იზოტოპთა გავრცელება სამყაროში.....	8
1.3 კოსმოსში მსუბუქი ელემენტების წარმოქმნის მოდელები X- პროცესებისათვის....	15
თავი 2. 2.1 კვლევის მას-სპექტრომეტრული მეთოდები.....	19
2.2 მას-სპექტრომეტრი და მისი აგებულება.....	21
2.3 ლაზერის სხივის ზემოქმედებით პლაზმის წარმოქმნისა და გავრცელების მექანიზმი იონურ წყაროში.....	27
2.4 ელექტროსტატიკური ანალიზატორი.....	31
2.5 მაგნიტური ანალიზატორი.....	31
2.6 მარეგისტრირებელი სისტემა.....	32
2.7 გარჩევისუნარიანობა.....	32
2.8 დისპერსია.....	33
2.9 მგრძნობიარობა.....	34
თავი 3. 3.1 მეტეორიტები და მათი მნიშვნელობა.....	35
3.2 მიღებული შედეგები და მათი ანალიზი.....	38
დასკვნა.....	46
გამოყენებული ლიტერატურა.....	47

შესავალი

მზე ჩვენი პლანეტის ძირითად ენერჯის წყაროს წარმოადგენს. დედამიწა განუწყვეტლივ თბება მზის სხივებით, რომლის ენერჯია განპირობებულია თერმობირთვული სინთეზის რეაქციებით, რომლებიც მიმდინარეობს მის შუაგულში. ამ რეაქციის შედეგად წყალბადის ბირთვები გარდაიქმნება ჰელიუმის ბირთვებად $4\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He}$. თითოეულ ამ აქტში გამოთავისუფლდება დაახლოებით 28 მეგ ენერჯია. 1939 წელს ჰანს ბეტემ გამოიკვლია სინთეზის ბირთვული რეაქციები რაზედაც 1967 წელს მიიღო ნობელის პრემია.

ბირთვული ასტროფიზიკა წარმოიქმნა ბირთვული ფიზიკისა და ასტროფიზიკის საზღვარზე. რომელიც შეისწავლის ისეთ მნიშვნელოვან საკითხებს, როგორცაა: ელემენტების ბირთვების გენეზისი და მათი გავრცელება სამყაროში, ვარსკვლავებში მიმდინარე პროცესები, მათი ენერჯის წყარო, მზის სისტემის წარმოქმნა და სხვა.

1957 წელს გ. ბერბიჯმა, დ. ბერბიჯმა, ფაულერმა და ჰოილმა თავიანთი შრომით აჩვენეს, რომ პერიოდული სისტემის ელემენტების ბირთვების უმრავლესობა წარმოიქმნება ვარსკვლავებში. რაც შეეხება მსუბუქ ბირთვებს ${}^6_3\text{Li}$, ${}^7_3\text{Li}$, ${}^9_4\text{Be}$, ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^{11}_5\text{B}$, რომლებიც ვარსკვლავებში არსებულ ტემპეტატურაზე თერმობირთვულ რეაქციებში ინგრევიან და არამდგრადები ხდებიან, ამდენად მათი წარმოქმნის ადგილი უნდა იყოს დაბალი სიმკვრივისა და ტემპერატურის არე. სივრცე , სადაც მათი წარმოქმნის რეაქციები მიმდინარეობს ძალზე გაიშვიათებულია.

დღეისათვის მსუბუქი ბირთვების წარმოქმნის ყველაზე აღიარებული მოდელია კოსმოსური სხივების ვარსკვლავთშორის ნივთიერებასთან ურთიერთქმედების რეაქციები. სადაც სამიზნე ბირთვებად განიხილება He, C, N, ხოლო ბომბარდირება ხდება P და α -ნაწილაკებით. ბირთვული ასტროფიზიკის მთელი რიგი საკითხებისა და მათ შორის მსუბუქი ბირთვების წარმოქმნის მოდელის სრულყოფის საქმეში იზოტოპების ფიზიკას დღეს მნიშვნელოვანი როლი უჭირავს.

თავი 1. 1.1 ელემენტთა ნუკლეოსინთეზი თერმობირთვულ რეაქციებში.

ვარსკვლავებში მიმდინარე ბირთვული პროცესები.

თავდაპირველად ითვლებოდა, რომ ქიმიური ელემენტების წარმოქმნის კერა იყო ან უცნობი ტიპის ვარსკვლავები, ან სამყაროს წარმოქმნის ძალიან ადრეული ეტაპები [3, 4]. არსებობს ეგრეთწოდებული “ილემის” თეორია, რომლის მიხედვითაც სამყაროს განვითარების საწყის სტადიაში მატერია შეკუმშული იყო ნეიტრონულ ნივთიერებად. მისი შემდგომი გაფართოებისას ნეიტრონები გარდაიქმნება $n \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$, ხოლო შემდეგ ბირთვული რეაქციების გზით წარმოიქმნება უკვე რთული ბირთვები.

ქიმიურ ელემენტთა გენეზისის კვლევის თანამედროვე ეტაპი დაიწყო მას შემდეგ, რაც აღმოჩნდა, რომ ვარსკვლავებში მიმდინარეობს წყალბადისა და ჰელიუმის წვა.

1954 – 1957 წლებში ჩატარდა მრავალრიცხოვანი გამოკვლევები ვარსკვლავებში ბირთვების წარმოქმნის გამოსაკვლევად, რომელთა კულმინაციას წარმოადგენს ჯ. და მ. ბერბიჯის, ჰოილის შრომები.[5]

იმისათვის, რომ ვარსკვლავებში წარმოიქმნას ბუნებაში არსებული პერიოდული ელემენტების 274 სტაბილური ბირთვი, როგორც აღმოჩნდა, საჭიროა რვა სხვადასხვა ტიპის ბირთვული პროცესი. [9]

1) წყალბადის წვა, პროტონ-პროტონული (P-P), ან ნახშირბად-აზოტური (CNO) ციკლების შედეგად. ორივე პროცესის დროს წყალბადი გარდაიქმნება ჰელიუმად.

2) ჰელიუმის წვა თანახმად სალპეტერის მოსაზრებისა $3\alpha \rightarrow {}^{12}_6\text{C}$. ე.ი. 3He - ის ბირთვი წარმოქმნის ნახშირბადს. ვარაუდობენ, რომ ამას მიყვარათ ${}^{16}_8\text{O}$ და ${}^{20}_{10}\text{Ne}$ - ის წარმოქმნამდე, იგივე ტემპერატურისა და სიმკვრივის პირობებში, როგორც იყო 3α - რეაქციების დროს.

3) პროცესი α - ნაწილაკების მონაწილეობით, როდესაც ${}^{20}_{10}\text{Ne}(\gamma, \alpha){}^{16}_8\text{O}$ ტიპის რეაქციების შდეგად α - ნაწილაკების გამოთავისუფლება მოგვცემდა ნაწილაკების წყაროს,

რომლებიც შედეგად შეიძლება ჩაიჭიროს ${}_{10}^{20}\text{Ne}$ -ის ბირთვებმა და წარმოიქმნას ${}_{12}^{24}\text{Mg}$, ${}_{14}^{28}\text{Si}$ და ა.შ. 40 – 48 ატომური წონის ბირთვებამდე.

4) წონასწორული პროცესი, რომელიც იძლევა ელემენტებს კოსმოსური გავრცელების მრუდის „რკინის პიკის“ არეში. ანუ, ასე ვთქვათ, იგი „პასუხისმგებელია“ 50 - დან 60 ატომური მასების ინტერვალში.

ყველა ჩამოთვლილი პროცესი მიმდინარეობს ისეთ ტემპერატურაზე, რომელიც განუწყვეტლივ მატულობს იმ მინიმალურ ტემპერატურიდან, რომლის დროსაც (P-P) რეაქცია გრძელდება მხოლოდ 3He -ის წარმოქმნამდე (ანუ $8 \times 10^6 \text{K}$), იმ ტემპერატურამდე, როცა ეფექტური ხდება წონასწორული პროცესები ($4 \times 10^9 \text{K}$).

5) წინა პროცესში წარმოქმნილი ბირთვები ქმნიან მასალას S - პროცესისათვის, რომელსაც ეყრდნობოდა გამოვი დიდი აფეთქების თეორიის შექმნისას. იგი წარმოადგენს რეაქციას ნეიტრონების ჩაჭერით და მიმდინარეობს საკმაოდ ნელა, რათა განსაზღვრული რაოდენობის β -აქტიურმა ბირთვმა მოასწროს დაშლა მანამ, ვიდრე მოხდებოდეს მორიგი ნეიტრონის ჩაჭერა. ასეთი რეაქცია წარმოქმნის მთელ რიგ ბირთვებს ${}_{83}^{209}\text{Bi}$.

6) ნეიტრონების ჩაჭერის მეორე და უფრო სწრაფი r - პროცესის არსებობა მალევე იქნა დამზერული, როდესაც ზუსისა და უერის ექსპერიმენტზე გამოჩნდა ორი s და r პიკი. მოცემული ფაქტი აიხსნება ნეიტრონთა მაგიური რიცხვების არსებობით, რომლებიც შეესაბამება ბირთვებში შევსებულ დონეებს. ამ რეაქციის დროს წარმოიქმნება ნეიტრონებით მიდიდარი მძიმე ელემენტები: U, Tr და ბირთვები ~ 270 ატომურ მასამდე.

7) P - პროცესი, რომელიც აუცილებელია პროტონებით მიდიდარი ზოგიერთი მძიმე ელემენტის წარმოსაქმნელად. სავარაუდოდ, მიმდინარეობდეს ძირითადად (P, γ) და (γ ,n) ტიპის რეაქციებით. უკვე არსებულ მძიმე იზოტოპებთან, მაღალი $\sim 10^9 \text{K}$ ტემპერატურის გარემოში.

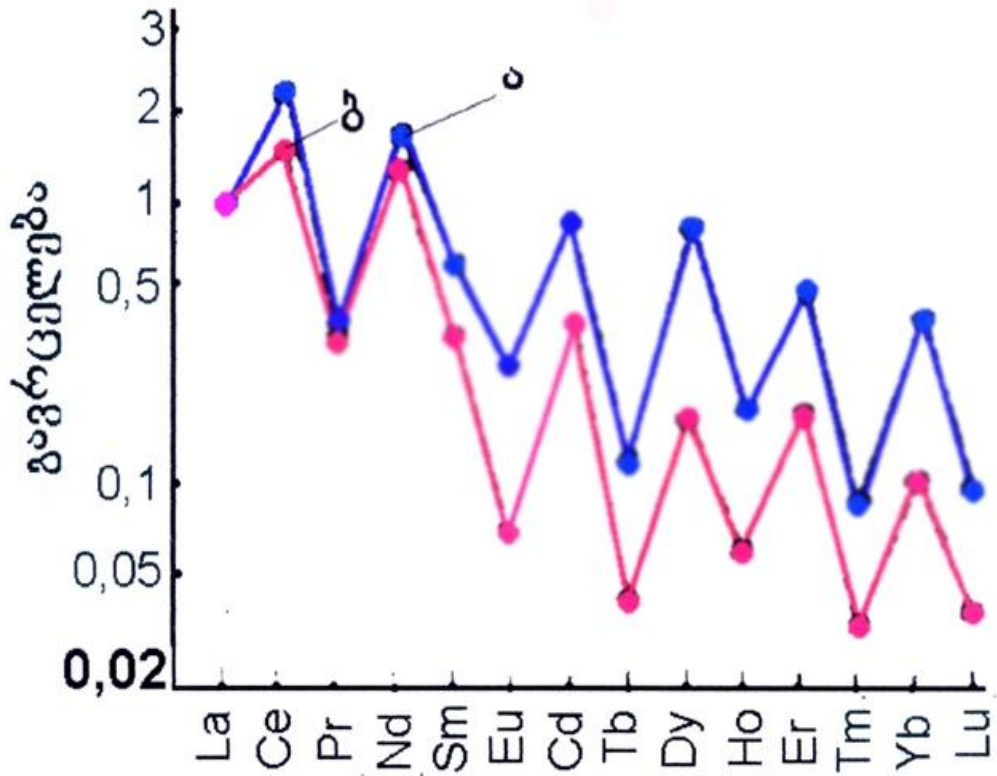
8) X-პროცესი, რომელიც აუცილებელია D, Li, Be და B ბირთვების წარმოქმნისათვის, ვინაიდან ვარსკვლავების ცენტრში, არსებულ პირობებში უკიდურესად არამდგრადები არიან.[1]

1.2 სხვადასხვა ელემენტების იზოტოპთა გავრცელება სამყაროში

მზისა და სხვა ვარსკვლავების გამოსხივების სპექტრის შესწავლამ, კოსმოსური სხივების შემადგენლობის გამოკვლევამ, მეტეორიტებისა და მთვარის ნიმუშების ქიმიურმა ანალიზმა აჩვენა, რომ სამყაროში არსებული ყველა ობიექტი, რომელიც ხელმისაწვდომია კვლევისთვის, შედგება ერთი და იგივე ქიმიური ელემენტებისაგან [6]. თუმცა ელემენტთა გავრცელება სამყაროში ხასიათდება მთელი რიგი თავისებურებებით. დედამიწაზე, მზეზე, სხვა პლანეტებზე, მეტეორიტებსა თუ კოსმოსურ სხივებში ერთი და იგივე ელემენტების გავრცელებები მკვეთრად განსხვავებულია ერთმანეთისაგან.

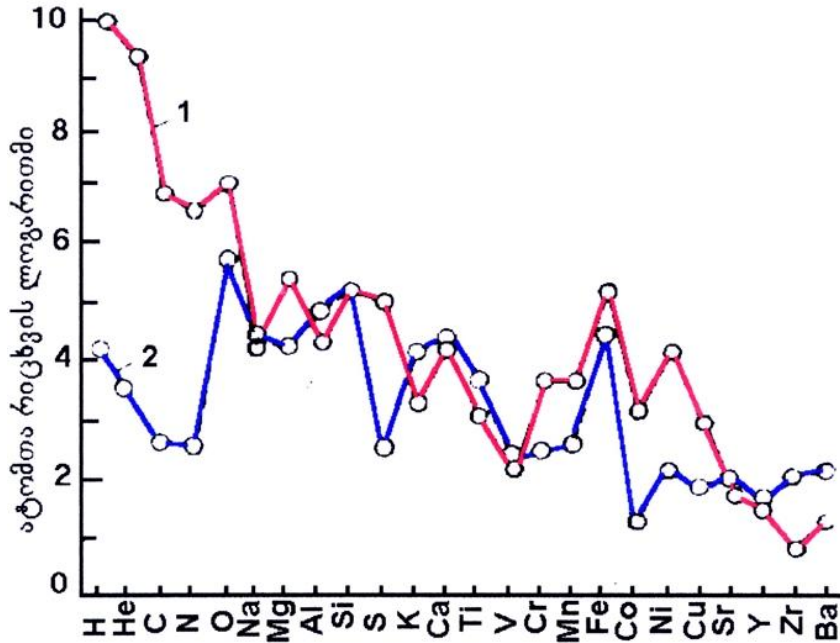
ელემენტების რიგითი ნომრის ზრდასთან ერთად მათი გავრცელება სწრაფად და არათანაბრად მცირდება, თუმცა ყველა მძიმე ელემენტისათვის დაახლოებით მუდმივი რჩება. პირველი 26 ელემენტის მასური წილი დაწყებული წყალბადიდან რკინის ჩათვლით შეადგენს დედამიწის ქერქის 94.74% - ს. თუმცა ამ ჯგუფიდან სამ ელემენტს - ლითიუმს, ბერილიუმს და ბორს ძალიან მცირე გავრცელებები გააჩნიათ. თითოეულის გავრცელება დედამიწის ქერქში 0.001% - ზე ნაკლებია. ლუნი რიგითი ნომრის მქონე ელემენტებს გააჩნიათ ბევრად მეტი გავრცელება, ვიდრე კენტი ნომრის მქონე მეზობელ ელემენტებს. მაგალითად: სტრონციუმის ($Z=38$) გავრცელება დედამიწის ქერქში ორჯერ მეტია ვიდრე რუბიდიუმისა ($Z=37$) და ათჯერ მეტი ვიდრე ითრიუმის ($Z=39$) და საერთოდ ყველა ლუნი ელემენტების წილი მასის მიხედვით ქერქში 86%-ია, ხოლო კენტი ელემენტებისა - 14%. ეს განსაკუთრებით კარგად ჩანს იშვიათმიან ელემენტებისათვის.

საერთოდ, ყველა ლუნ რიგითნომრიანი ელემენტის მასური წილი დედამიწის ქერქში შეადგენს 86%-ს, ხოლო ყველა კენტ რიგითნომრიანი ელემენტების წილი - 14%-ს. ეს თავისებურება ნათლად ჩანს იშვიათმინა ელემენტებისათვის. (ნახ.1)



ნახ.1 იშვიათმინა ელემენტების ფარდობითი გავრცელება

ა) დედამიწის ქერქში ბ) მეტეორიტებში



ნახ.2 ძირითადი ქიმიური ელემენტების ფარდობითი გავრცელება

1) მზებზე 2) დედამიწაზე

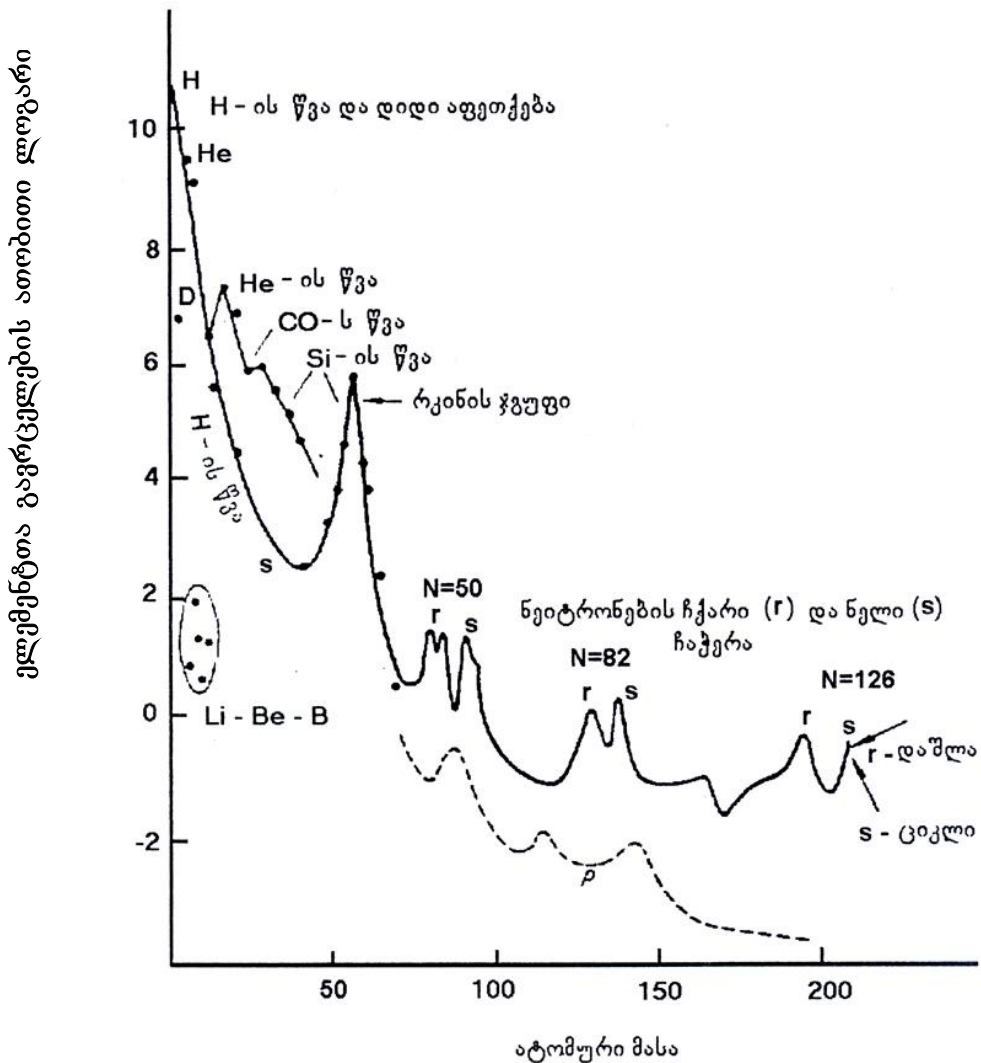
ნახ.2 - ზე ნარმოდგენილია ელემენტთა გავრცელება დედამიწასა და მზებზე. მართალია წყალბადისა და ჰელიუმის რაოდენობა დედამიწაზე გაცილებით ნაკლებია, ვიდრე მზებზე, თუმცა სავარაუდოდ ეს აიხსნება იმით, რომ მოცემული ელემენტები დედამიწამ დაკარგა, ხოლო მზემ კი შეინარჩუნა მისი გრავიტაციული ველის გამო. თუ არ გავითვალისწინებთ მკვეთრ განსხვავებას ყველაზე მსუბუქ ელემენტებში, მაშინ დაწყებული ნატრიუმიდან, ელემენტთა გავრცელებები საკმაოდ ახლოსაა ერთმანეთთან. ასევე ბევრი საერთო ვლინდება მზესა და კოსმოსურ სხივებში ელემენტთა გავრცელებების შედარებისას, თუმცა, მათ შორის არის მკვეთრი განსხვავებებიც. მოცემულ კანონზომიერებას ამტკიცებს მთვარის ნიმუშების ანალიზიც.

ელემენტებისა და მათი იზოტოპების გავრცელებები, რა თქმა უნდა ყველაზე უკეთ დედამიწისთვისაა შესწავლილი. დედამიწაზე ელემენტების გავრცელების კანონზომიერებების შესწავლა დაიწყო XIX - XX საუკუნეების მიჯნაზე ვ.ი. ვერნარდსკის და ფ.კლარკის სამუშაოებით. შემდგომში, 20-იან წლებში გოლდშმიდტმა ჩაატარა უფრო

ფართო მაშტაბიანი სამუშაოები, რომლის შედეგად მან ჩამოაყალიბა ელემენტების კოსმოსური გავრცელების კანონზომიერებები. თავდაპირველად ცდილობდნენ დაეკავშირებინათ ელემენტების გავრცელებები მათ ქიმიურ თვისებებთან, მაგრამ ყოველგვარი ჰიპოთეზა იყო წარუმატებელი. მაგალითად გამოდგება ლანთანოიდთა ჯგუფი, რომელთაც აქვთ ძალიან მსგავსი ქიმიური თვისებები, რაც გამონწვეულია მათი გარე ელექტრონული შრეების ერთნაირი აგებულებით, თუმცაღა გავრცელებები აბსოლიტურად სხვადასხვანაირი აქვთ. ტუტელითონების ფარგლებში მხოლოდ ნატრიუმს და კალიუმს აქვთ ერთნაირი და შედარებით მაღალი გავრცელებები (2,5 %) დედამიწის ქერქში, იმ დროს, როდესაც რუბიდიუმისთვის გვაქვს - 0,015%, ლითიუმისათვის 0,004%, ცეზიუმისათვის - 0,0004%. ასევე შეიძლება მრავალი მაგალითის მოყვანა, რომლებიც გვიჩვენებენ, მსგავსი ქიმიური თვისებების მქონე ელემენტები მკვეთრად განსხვავდებიან გავრცელებულობის მიხედვით და პირიქით, სრულიად განსხვავებული ქიმიურთვისებების მქონე ელემენტებს აქვთ თითქმის ერთნაირი გავრცელებები. მოცემული მაგალითიდან ჩანს, რომ ელემენტის ქიმიურ შემადგენლობასა და გავრცელებას შორის არავითარი კავშირი არ არსებობს. გოლდშმიდტმა ელემენტების გავრცელება დაუკავშირა მისი ბირთვების მდგრადობას. დღეისათვის მეცნიერებას დაგროვილი აქვს უზომოდ დიდი ექსპერიმენტული მასალა, რომლებიც გოლდშმიდტის მიერ მიღებულ კანონზომიერებებს ადასტურებს, ხოლო მის მიერ გამოთქმული მოსაზრება, რომ ბუნებაში ელემენტის გავრცელების სიხშირე დაკავშირებულია ბირთვის თვისებებთან, გახდა საფუძველი ელემენტებისა და მათი იზოტოპების ბირთვების სინთეზთან დაკავშირებული საკითხებისათვის.

ელემენტის გავრცელება არ შეიძლება აიხსნას მათი ბირთვული თვისებების გარეშე. ეს თვისებები ვლინდება პირელ რიგში, ერთი და იგივე ელემენტებისათვის რამოდენიმე იზოტოპების არსებობაში. მაგალითად, უანგბადს აქვს სამი სტაბილური იზოტოპი: ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O . ამ სამ ბირთვს სრულიად განსხვავებული თვისებები აქვს. ცალკეული ელემენტების ბირთვული თვისებები აისახება იმ კანონზომიერებებში, რომლითაც

ხასიათდება იზოტოპების გავრცელება. მიწის ქერქში იზოტოპების გავრცელებების ანალიზი გვიჩვენებს, რომ ყველაზე მრავალრიცხოვანია ჯგუფი იზოტოპებისა, რომელთაც აქვთ პროტონებისა და ნეიტრონების ლუნი რიცხვი (ე.წ. ლუნ-ლუნი იზოტოპები - $^{16}_8\text{O}$, $^{18}_8\text{O}$, $^{56}_{26}\text{Fe}$, $^{58}_{28}\text{Ni}$ და სხვა). მათ მოჰყვება იზოტოპები, რომელთაც კენტი აქვთ ან ნეიტრონების, ან პროტონების რიცხვი ($^{35}_{17}\text{Cl}$, $^{37}_{17}\text{Cl}$, $^{73}_{32}\text{Ge}$ და ა.შ.). ყველაზე ნაკლებია იზოტოპები ნეიტრონებისა და პროტონების კენტი რიცხვით. გამონაკლისია მხოლოდ ოთხი არა რადიოაქტიური იზოტოპი ^2_1H , ^6_3Li , $^{10}_5\text{B}$ და $^{14}_7\text{N}$ (ნახ.3).

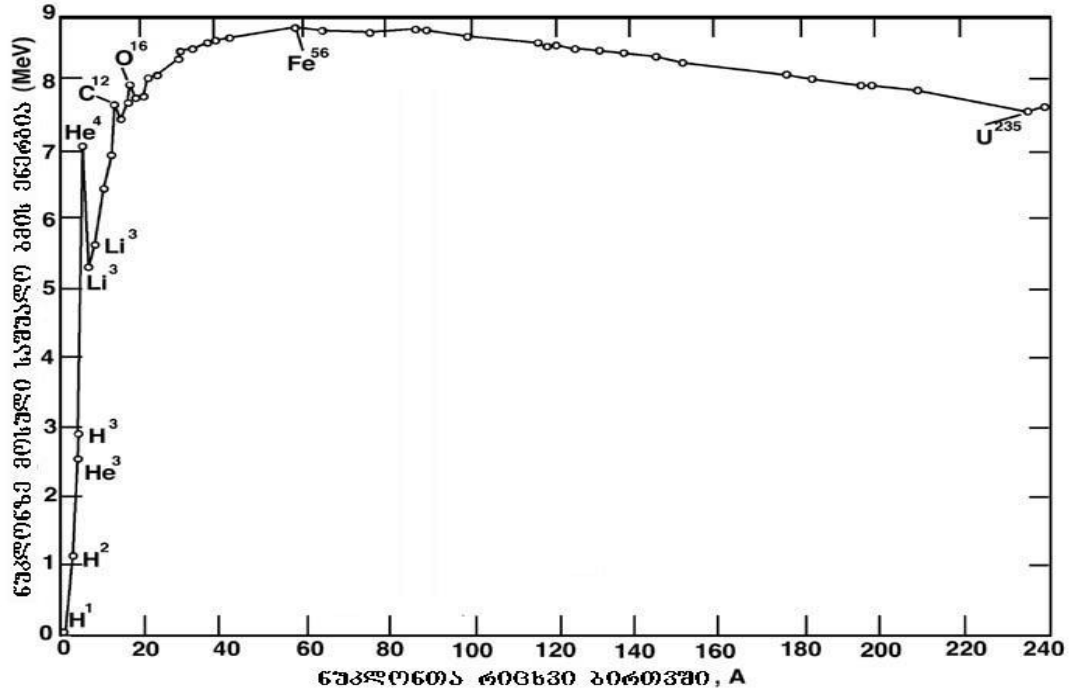


ნახ.3 ნუკლიდების გავრცელების სტრუქტურული მრუდი მზისა და მსგავსი ვარსკვლავებისათვის

ნახ.3 ვხედავთ, რომ ელემენტების რიგითი ნომრის ზრდასთან ერთად მათი გავრცელება სწრაფად და არათანაბრად მცირდება. სამყაროს ნივთიერება ძირითადად შედგება წყალბადისა და ჰელიუმისგან. ეს ორი ელემენტი წარმოადგენს ვარსკვლავების, ვარსკვლავთშორისი გაზისა და კოსმოსური სხივების მასის ძირითად ნაწილს. ჰელიუმის შემდეგ, მრუდზე გვაქვს მკვეთრი დავარდნა, რაც გამონვეულია ლითიუმის, ბერილიუმისა და ბორის მცირე გავრცელებით. მათი გავრცელება ასიათასჯერ ნაკლებია და სწორედ მათი წარმოქმნის წყაროა ჯერ კიდევ დაუდგენელი. შემდგომში, მრუდზე გვაქვს აღმასვლა, გამონვეული ნახშირბადისა და მისი მომდევნო ელემენტების (ჟანგბადიდან - კალციუმამდე) დიდი გავრცელებულობით. ეს უბანი ხასიათდება იმით, რომ მასში ჭარბობს იზოტოპები, რომელთაც პროტონებისა და ნეიტრონების ერთნაირი რაოდენობა აქვთ, ხოლო მასური რიცხვი ოთხის ჯერადია.

აღმოჩნდა, რომ იმ ელემენტების გავრცელებები, რომელთა იზოტოპებს გააჩნიათ პროტონების ან ნეიტრონების შემდეგი რიცხვები: 2, 8, 20, 50, 82, ან 126, მნიშვნელოვნად მეტია მეზობელი ელემენტების გავრცელებაზე. მაგალითად, კალის ($Z=50$) გავრცელება 10-ჯერ მეტია ინდიუმის ($Z=49$) გავრცელებაზე და 5-ჯერ მეტი სტიბიუმის ($Z=51$) გავრცელებაზე. აღნიშნულ რიცხვებს „მაგიურ“ რიცხვებს უწოდებენ.

არსებობს იზოტოპი, რომელიც დედამიწაზე ძალიან დიდი რაოდენობითაა, მაგრამ მისი პროტონებისა და ნეიტრონების რიცხვი არ ეკუთვნის „მაგიურს“, ასეთია რკინა - $^{56}_{26}\text{Fe}$. რკინის იზოტოპების ნარევი აღნიშნული იზოტოპის დიდი პროცენტული შემცველობა განპირობებულია ისევედასევე ბირთვული თვისებებით: $^{56}_{26}\text{Fe}$ - ბირთვს აქვს ყველაზე დიდი კუთრი ბმის ენერჯია. (ნახ.4)



ნახ.4 ნუკლონთა ბმის კუთრი ენერგია ელემენტთა იზოტოპებისათვის

მრუდზე გამოხატულია მკვეთრი მაქსიმუმი რკინის ჯგუფის არეში ($A=50-60$), რაც აიხსნება ამ ელემენტთა ბირთვების განსაკუთრებული მდგრადობით სხვა ბირთვებთან შედარებით. ცნობილია, რომ რკინის მახლობელ ელემენტთა ბირთვებს გააჩნიათ ბმის კუთრი ენერგიის მაქსიმალური მნიშვნელობა (ნახ.4), რაც განაპირობებს მათ განსაკუთრებულ მდგრადობას ყველა ქიმიური ელემენტის იზოტოპებს შორის.

რკინის ჯგუფის შემდეგ ელემენტების გავრცელება თანდათან კლებულობს, მაგრამ აქაც არის გამოკვეთილი მაქსიმუმები, რომლებიც შეესაბამება ნუკლონებს “მაგიური” რიცხვებით. ბმის კუთრი ენერგიის მრუდზეც აღნიშნული ტიპის ბირთვები ასევე ხასიათდებიან ლოკალური მაქსიმუმებით.

ამრიგად, შეიძლება ითქვას, რომ ელემენტების წარმოქმნა და მათი გავრცელება სამყაროში დამოკიდებულია მათ ბირთვულ თვისებებზე და ბირთვულ პროცესებზე.

1.3 კოსმოსში მსუბუქი ელემენტების წარმოქმნის მოდელები

X- პროცესებისათვის

როგორც, ითქვა პერიოდული სისტემის თითქმის ყველა ელემენტი წარმოიქმნება ვარსკვლავებში. გამონაკლისია მხოლოდ Li, Be, B, რომლებიც ვარსკვლავებში არსებულ ტემპერატურაზე თერმობირთვულ რეაქციებში ინგრევიან, ამიტომ კოსმოსში არსებულ რაოდენობამდე ვერ დაგროვდებიან.

დღეისათვის არსებობს მათი X-პროცესებში წარმოქმნის რამდენიმე მოდელი, ცხადია ყოველი მათგანი გულისხმობს, რომ გარემო, სადაც ისინი წარმოიქმნებიან დაბალტემპერატურული და გაიშვიათებულია, ე.ი. თერმობირთვული რეაქციები გამორიცხულია, აღნიშნული ელემენტები წარმოიქმნება ბირთვულ რეაქციებში, რომლებიც მიმდინარეობს აჩქარებული ნაწილაკებით ძირითადად P-ებით.

1970 წელს რივსმა, ფაულერმა და ჰოილმა გამოთქვეს მოსაზრება, რომ დიდი ნაწილი მსუბუქი ბირთვებისა წარმოიქმნება კოსმოსური სხივების ურთიერთქმედებით ვარსკვლავთშორის ნივთიერებასთან. ეს მოსაზრება შემდგომში განავითარეს ფაულერმა, რივსმა და სილკმა და მიტლერმა.

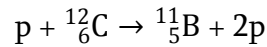
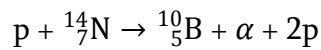
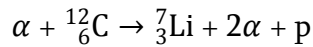
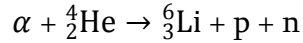
მსუბუქი ბირთვების წარმოქმნის მოდელების შექმნას 50 წლის ისტორია აქვს და ყურადღება მის მიმართ განუწყვეტლივ მატულობს. ამ ელემენტებისათვის დამახასიათებელია დაბალი გავრცელება კოსმოსში და მზის სისტემაში. როგორც ითქვა. ისინი ვერ წარმოიქმნებოდნენ მზის ბირთვში მიმდინარე თერმობირთვულ რეაქციებში, რადგან პროტონებიდან ჰელიუმის სინთეზისათვის საჭირო ტემპერატურა 10^7 K -ს აღემატება და p და α ნაწილაკებისათვის საჭირო ენერგეტიკული რეაქციების ტემპერატურას. მართლაც, Li - თვის $T=2 \times 10^6$ K, Be -თვის 4×10^6 K და B - თვის 5×10^6 K. ასეთი რეაქციების მაგალითებია:

ბირთვული რეაქცია	რეაქციის ენერჯია - Q MeV
$D(p,\gamma)3\text{He}$	5,484
$6\text{Li}(p,3\text{He})4\text{He}$	4,012
$7\text{Li}(p,\gamma)11\text{Be} \rightarrow 2\ 4\text{He}$	17,284
$9\text{Be}(p,\alpha)6\text{Li}$	3,193
$10\text{B}(p,\alpha)7\text{Be}$	2,560
$11\text{B}(p,\gamma)3\ 4\text{He}$	8,677

აღიშნული ელემენტების რაოდენობა კოსმოსში მცირეა, მაგრამ საჭიროა მათი არსებობის ახსნა. ადგილები სადაც ისინი შეიძლება წარმოიქმნან, სხვადასხვა პროცესში დასახელებულია: ვარსკვლავების ზედაპირი, ვარსკვლავის გარშემო ნისლი, კოსმოსური სხივების ურთიერთქმედება ვარსკვლავთშორისო ნივთიერებასთან, ზეახალის აფეთქება, წითელი გიგანტები და ა.შ.

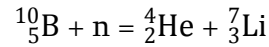
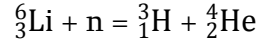
მოდელის სწორედ ასარჩევად საჭიროა განხილულ იქნას ყოველი ბირთვული რეაქცია, რომელიც კი შესაძლებელია მოხდეს კოსმოსში. ელემენტების Li, Be და B-ის წარმოქმნის თვალსაზრისით ასეთი რეაქციების რაოდენობა ძალზე დიდია მაგრამ, თუ შევარჩევთ კოსმოსში უფრო მეტად გავრცელებულ ბირთვებს, მაშინ უნდა შევჩერდეთ შემდეგ ელემენტებზე: H, He, C, O, Fe. ანალიზი გვიჩვენებს, რომ აჩქარებული ბირთვებიდან მნიშვნელოვანია p და α -ნაწილაკები, ხოლო სამიზნე ბირთვებიდან ^4He , ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O , ^{56}Fe და სხვა. სამუშაოები ძირითადად ჩატარდა იონურ-იონური წყაროს მქონე მას-სპექტრომეტრების საშუალებით, ხოლო, მეორეს მხრივ, რეაქციებისათვის საჭირო ენერჯიების დიაპაზონს ვერ ფრავს დღეისათვის არსებული ამჩქარებლები. მოდელირება ხდებოდა ძირითადად იმ რეაქციებისა, რომლებშიაც შესაბამისად აჩქარებული p და α -ნაწილაკებით აყუმბარებდნენ ^4He , ^{12}C , ^{14}N , ^{16}O , ^{56}Fe სამიზნეს, აჩქარებული ნაწილაკების

ენერგია იყო რამდენიმე ევ-დან რამდენიმე მილიარდ ევ-მდე. რითვისაც იყენებდნენ სხვადასხვა ტიპის ამაჩქარებლებს: ვან დე გრაფის ტანდემური ამაჩქარებელი, ციკლოტრონი, სინქროტრონი. თითქმის 20 წლის მუშაობის პროცესში დადგენილ იქნა, რომ ${}^6_3\text{Li}$, ${}^7_3\text{Li}$, ${}^{10}_5\text{B}$, ${}^{11}_5\text{B}$ და ბირთვები წარმოიქმნება მთელ რიგ რეაქციებში, მათ შორის მაგალითად :

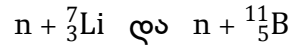


აღნიშნული სამუშაოების განხილვის და ყველა შედეგების გაერთიანების საფუძველზე აიგო ბირთვული რეაქციების კვეთის ენერგიაზე დამოკიდებულების მრუდები (მაგალითად, ნახ.2 და ნახ.3-ზე მოცემულია $p + C$ და $p + O$ რეაქციების ჯამური კვეთი), რომელთა განხილვამ აჩვენა, რომ არსებული მოდელებიდან რეალურ სურათს ყველაზე უკეთ ასახავს კოსმოსური სხივების ვარსკვლავთშორის ნივთიერებასთან ურთიერთქმედების მოდელი. მართლაც, სივრცე, სადაც ეს რეაქციები მიმდინარეობს ძალზე გაიშვიათებულია, მაგრამ ვინაიდან კოსმოსური სხივები გალაქტიკაში დიდ მანძილებს გადიან, გამოთვლილი სიდიდე საკმაოდ კარგად თანხვდება თეორიულად წარმოდგენილს. თუმცა, კვლავ დიდ სიძნელედ რჩება ${}^7_3\text{Li}/{}^6_3\text{Li}$ და ${}^{11}_5\text{B}/{}^{10}_5\text{B}$ ფარდობების შინაარსი. მართლაც, როგორც ნახაზიდან ჩანს, ერთი და იგივე ელემენტის იზოტოპებისათვის რეაქციის კვეთები ყოველი ენერგიისათვის თითქმის თანაბარია. ამდენად, აღნიშნული ფარდობები ~ 1 ის ტოლია.

მეორეს მხრივ გვაქვს ცალსახა ექსპერიმენტული ფაქტი, რომ დედამიწის, მთვარის და მეტეორიტების ნიმუშებში ${}^7_3\text{Li}/{}^6_3\text{Li}$ და ${}^{11}_5\text{B}/{}^{10}_5\text{B}$ ფარდობები შესაბამისად 12,5 და 4. ამ შედეგების მიღება კი პრაქტიკულად შეუძლებელია ზემოთ გახილულ კოსმოსური სხივების ვარსკვლავთშორის ნივთიერებასთან ურთიერთქმედების პროცესში. ამიტომ, დამატებით განიხილავენ შემდეგ რეაქციებს :



რეაქციები ეგზოთერმულია და აქვთ დიდი რეაქციების კვეთა ~ 4000 ბარნი . რაც შეეხება რეაქციებს:



მათი კვეთები დაახლოებით 0 - ის ტოლია. ამდენად, ვარსკვლავებში ფარდობების ${}^7_3\text{Li}/{}^6_3\text{Li}$ და ${}^{11}_5\text{B}/{}^{10}_5\text{B}$ მნიშვნელობები მცირდება და წილადები მიისწრაფვის უსასრულობისკენ.

დასახელებულ ობიექტებში ფარდობები ყველგან ერთნაირია, სად და როდის მოხდა ამ ნივთიერებების შერევა და ასეთი კარგი იზოტოპური ჰომოგენიზაცია ატომურ ღონეზე?

შემდგომში ნაპოვნი იქნა არა ერთი მცირე ცვლილება აღნიშნულ იზოტოპურ ფარდობებში, მაგრამ ყოველი მათგანი ადვილად აიხსნება ცნობილი ეფექტებით: პირველი - იზოტოპური ფრაქციონირებით. ეს ეფექტი გამონვეულია ერთი და იგივე ელემენტის იზოტოპების მასებს შორის მცირე განსხვავებით, რომელიც პროპორციულია რამოდენიმე ნეიტრონის მასის $\Delta m = 1 \div 10 m_n$ დაიმზირება შემდეგ პროცესებში: აორთქლება, დიფუზია, იზოტოპური გაცვლა ფაზების საზღვრებზე, ქიმიური რეაქციები და ა.შ. ყველა ამ პროცესში ფრაქციონირების სიდიდე პროპორციულია იზოტოპების მასათა სხვაობის.

მეორე მიზეზი არის ბირთვული რეაქციები, რომელთა შედეგად წარმოიქმნება ახალი იზოტოპები. ასეთი პროცესებია ბირთვების ნგრევა ჩქარი კოსმოსური სხივებით, რის შედეგადაც გროვდება კოსმოგენური იზოტოპები, რადიოაქტიური დაშლის პროცესები, სპონტანური გაყოფა - გამონვეული ნეიტრონების შთანთქმით და სხვა.

მოგვიანებით, ჟანგბადის იზოტოპურ ფარდობებში დამზერილ იქნა ანომალიები _ სხვადასხვა იზოტოპების ფარდობების ვარიაციები განსხვავდებოდა ერთმანეთისაგან. გამოდიოდა, რომ ჟანგბადი გამდიდრებულია ${}^{16}_8\text{O}$ -ის ბირთვებით. ეს ფაქტი კი მოწმობს ორი რეზერვუარის არსებობას. ასეთივე ანომალიები დაფიქსირდა როგორც ინერტული აირებისათვის, ასევე შემდეგი ელემენტებისათვის: Ba, Ti, Nd, Ca, Cr, Si, Mg.

აღნიშნული ანომალიების საფუძველზე გაკეთდა მნიშვნელოვანი დასკვნა იზოტოპური კოსმოგონიისათვის: პროტომზის ნისლოვანი არ იყო ატომიზირებული იმ დონემდე, რომ წაეშალა განსხვავება პირველად იზოტოპურ შემადგენლობაში, რომლებიც განსხვავდებოდნენ სხვა თერმობირთვული რეაქციებით. მზის ნისლოვანის ნივთიერებას, რომელიც ამ დროისათვის მტვერის სახით მაინც იყო, დაემატა ატომიზირებული ზეახალის ნივთიერება. ამდენად, ჰომოგენიზაცია ატომურ დონეზე არ მომხდარა [9]. მაგრამ, თუ ეს ასეა, მაშინ იგივენაირი ანომალიები უნდა დაფიქსირდეს ასევე მსუბუქი ბირთვების შემთხვევაშიც.

თავი 2. 2.1 კვლევის მას-სპექტრომეტრული მეთოდები

მოკლე ისტორიული მიმოხილვა

მიკროელექტრონიკის, ბირთვული ასტროფიზიკის და თანამედროვე გამოყენებითი მეცნიერების სხვა დარგების შემდგომი განვითარების ერთერთი აუცილებელი პირობაა ნივთიერებათა კვლევის ისეთი მაღალმგრძობიარე მეთოდის შექმნა, რომელიც მოგვცემს საშუალებას განვსაზღვროთ 10^{-10} - 10^{-11} გრამის რიგის მიკრომოცულობის ნივთიერების ელემენტური და იზოტოპური შემცველობა, იზოტოპურ ფარდობათა ვარიაციები და სხვა.

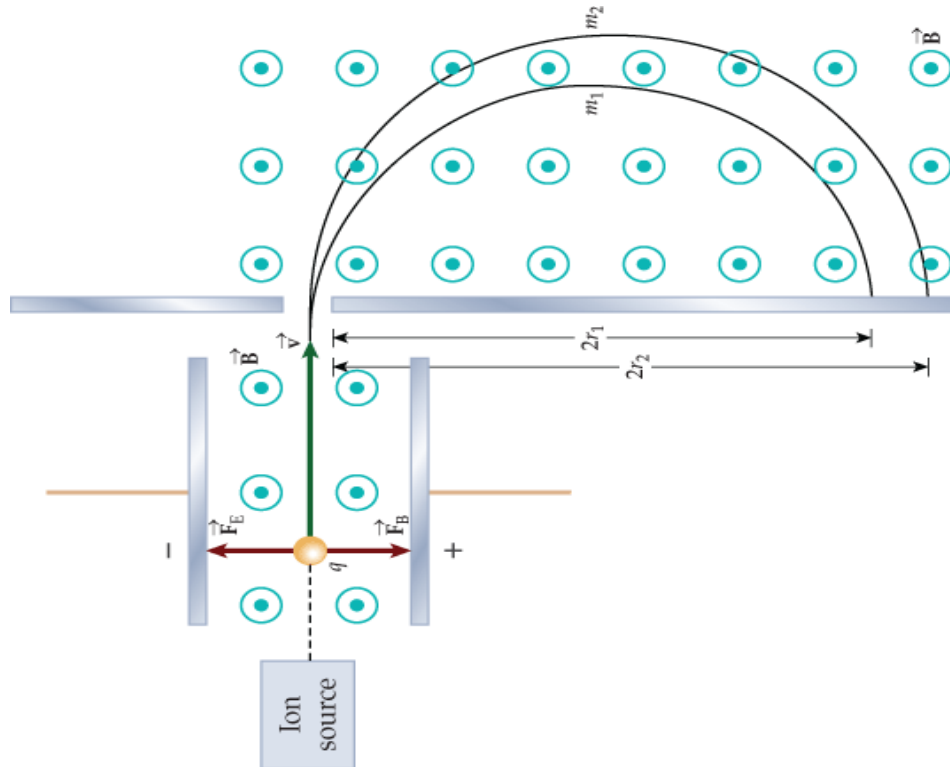
დღეისათვის, ნივთიერებათა კვლევის მაღალმგრძობიარე მეთოდებს წარმოადგენს: ოპტიკური სპექტროგრაფია, ადსორბციული სპექტრომეტრია, ატომური ადსორბცია, ნეიტრონული აქტივაცია, პოლაროგრაფია, მას-სპექტრომეტრია და სხვა. ყველა ამ მეთოდს აქვს თავისი როგორც დადებითი, ასევე უარყოფითი მხარეები, რაც განსაზღვრავს მათი გამოყენების სფეროს.

უკანასკნელ წლებში განსაკუთრებით ინტენსიურად ვითარდება მას-სპექტრომეტრიული მეთოდები. აღნიშნული მეთოდები ითვალისწინებს ნიმუშის იონიზაციას სხვადასხვა ხერხებით, ფორმირებული იონური კონის დაშლას მასის მუხტთან ფარდობის მიხედვით და მიღებული მასური სპექტრის რეგისტრაციას ფოტო ან ელექტრული მეთოდით.

პირველი მას-სპექტრომეტრი შექმნა ტომსონმა 1912 წელს. ტომსონის კვალს გაყვნი ატონი და დემპსტერი. ატონმა შექმნა ხელსაწყო, რომელსაც უწოდა მას-სპექტროგრაფი. მის მიერ მიღწეული გარჩევისუნარიანობა მრავალი ელემენტის იზოტოპების გარჩევის საშუალებას იძლეოდა. ასევე, შესაძლებელი გახდა გაზომილიყო გადახრები “მთელი” მასებიდან. ატონის სამუშაოების პარალელურად დემპსტერმა აავო სხვა ტიპის მას-სპექტრომეტრი, რომელიც იძლეოდა მონოენერგეტიკულ იონურ სხივს. მან ასევე შექმნა ახალი ტიპის იონების წყარო, რომელშიც გამოიყენებოდა ელექტრონული ბომბარდირების მეთოდი, ასევე შექმნა იონების ელექტრული დეტექტირების სისტემა. ცოტა მოგვიანებით, ბარტკიმ და დემპსტერმა გამოაქვეყნეს იონური კონების ორმაგი ფოკუსირების თეორია, რაც ითვალისწინებდა იონთა ნაკადის მიმდევრულად გატარებას ელექტრულ და მაგნიტურ ველებში. მალე ამ თეორიაზე დაყრდნობით მატაუხის და ჰერცოგის მიერ კონსტრუირებულ იქნა მას-სპექტრომეტრი, რომელშიც ფოკუსირების ასეთი მეთოდი იყო გამოყენებული. აღნიშნულ ხელსაწყოს გააჩნდა უკვე მნიშვნელოვნად მაღალი მგრძობიარობა, ხოლო მისი გარჩევისუნარიანობა აღწევდა 1000-ს. ასეთი მახასიათებლები კი უკვე შესაძლებელს ხდის ერთმანეთისაგან გავარჩიოთ ცალკეული ნივთიერებების იზობარული იონები.

2.2 მას-სპექტრომეტრი და მისი აგებულება

დემპსტერის ხელსაწოს მაგალითზე ნათლად შეგვიძლია აღვწეროთ იონების მოძრაობა და შემოვიტანოთ ძირითადი განმარტებები, რომელიც ახასიათებს სექტორული ტიპის მაგნიტური ანალიზატორის მქონე მას-სპექტრომეტრებს.



ნახ.5 იონური სხივის ტრაექტორია

დავუშვათ, იონების წყაროში წარმოქმნილი იონი (ნახაზზე იგი აღნიშნულია იგი ჯვრით, ნახ.5) A წერტილიდან გადის პოტენციალთა სხვაობას U , რომელიც მოდებულია B და C წერტილებს შორის. ამ შემთხვევაში, სიჩქარე V , რომელსაც შიძენს აღნიშნული იონი მასით m და მუხტით e , შეგვიძლია განვსაზღვროთ ნაწილაკის კინეტიკური ენერჯისა და ერთგვაროვანი ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობის განტოლებით:

$$\frac{mv^2}{2} = eU \quad (2.1)$$

ეს განტოლება ჩანერილია იმის გათვალისწინებით, რომ V-ს მნიშვნელობა გაცილებით მცირეა სინათლის სიჩქარეზე და იონმა B და C წერტილებს შორის შეაწია უმნიშვნელოთ მცირე სიჩქარით. S_1 ხვრელის გავლის შემდეგ იონი ექცევა ნახაზის სიბრტყის მართობული ძალხაზების მქონე ერთგვაროვანი მაგნიტური ველის არეში. იგულისხმება, რომ მაგნიტურ ველს აქვს მკაცრი საზღვარი S_1 და S_2 წრფის გასწვრივ. დამუხტულ ნაწილაკზე B ინდუქციის მაგნიტურ ველში მოძრაობის პროცესში მოქმედებს ლორენცის ძალა და მის სანინაამდეგოდ მიმართული ცენტრიდანული ძალა. ამ ორი ძალის ტოლობა განსაზღვრავს სწორედ რკალური ტრაექტორიის იმ R რადიუსს, რომელზეც იმოძრავენ იონი S_1 ხვრელის გავლის შემდეგ.

$$eVB = \frac{mv^2}{R} \quad (2.2)$$

(2.1) და (2.2) ტოლობების საშუალებით საბოლოოდ მივიღებთ:

$$\frac{m}{e} = \frac{R^2 B^2}{2U} \quad (2.3)$$

ამას ეწოდება მას-სპექტრომეტრის ძირითადი განტოლება. პრაქტიკულად უფრო მოსახერხებელია იონის მასის მასურ რიცხვებში - M, ხოლო მუხტისა ელექტრონის ჯერად - Z მუხტით გამოსახვა, მაშინ (2.3) ტოლობა ასე ჩაიწერება:

$$R = \frac{144}{B} \sqrt{\frac{M}{Z}} U \quad (2.4)$$

B და U ოპტიმალური მნიშვნელობისათვის იონი იმოძრავენ (2.4) ტოლობით გამოთვლილი რადიუსის რკალზე, შემობრუნდება Π რად. კუთხით და გაივლის რა S_2 ხვრელს მოხვდება K - კოლექტორზე.

თუ A იონიზაციის წყაროდან გამოდის სხვადასხვა $\frac{M}{Z}$ ფარდობის იონები, მაშინ U და B-ს, ან ორივე ერთდროული ცვლილებით შეგვიძლია სხვადასხვა იონები რიგ-რიგობით გავატაროთ S_2 ხვრელში და დავაფიქსიროთ K კოლექტორზე.

ორმაგი ფოკუსირების მას-სპექტრომეტრი ზოგადად შედგება იონების წყაროს, ანალიზატორისა და მარეგისტრირებელი სისტემისაგან. იონების წყაროში ხდება ნიმუშის შემადგენელი ატომების იონიზაცია და აჩქარება გარკვეულ ენერგიამდე. ეს აჩქარებული იონების კონა გაივლის რა ანალიზატორში არსებულ ურთიერთმართობულ ელექტრულ და მაგნიტურ ველებს, მოხდება მისი შემადგენელი იონების დაშლა განსხვავებულ კონებად მასის მუხტთან ფარდობის მიხედვით, რომლებიც ფოკუსირდებიან ანალიზატორის გამოსავალთან არსებულ ფოკალურ სიბრტყეში. სწორედ ამ სიბრტყეშია განლაგებული მარეგისტრირებელი სისტემა, რომელიც ახდენს იონების რეგისტრირებას.

იონების წყაროები ერთმანეთისაგან განსხვავდებიან ნიმუშის იონიზაციის მეთოდებით. არსებობს იონურ-იონური, ელექტრონულ-იონური, ნაპერწკალურ-იონური და ლაზერულ-იონური წყაროები.

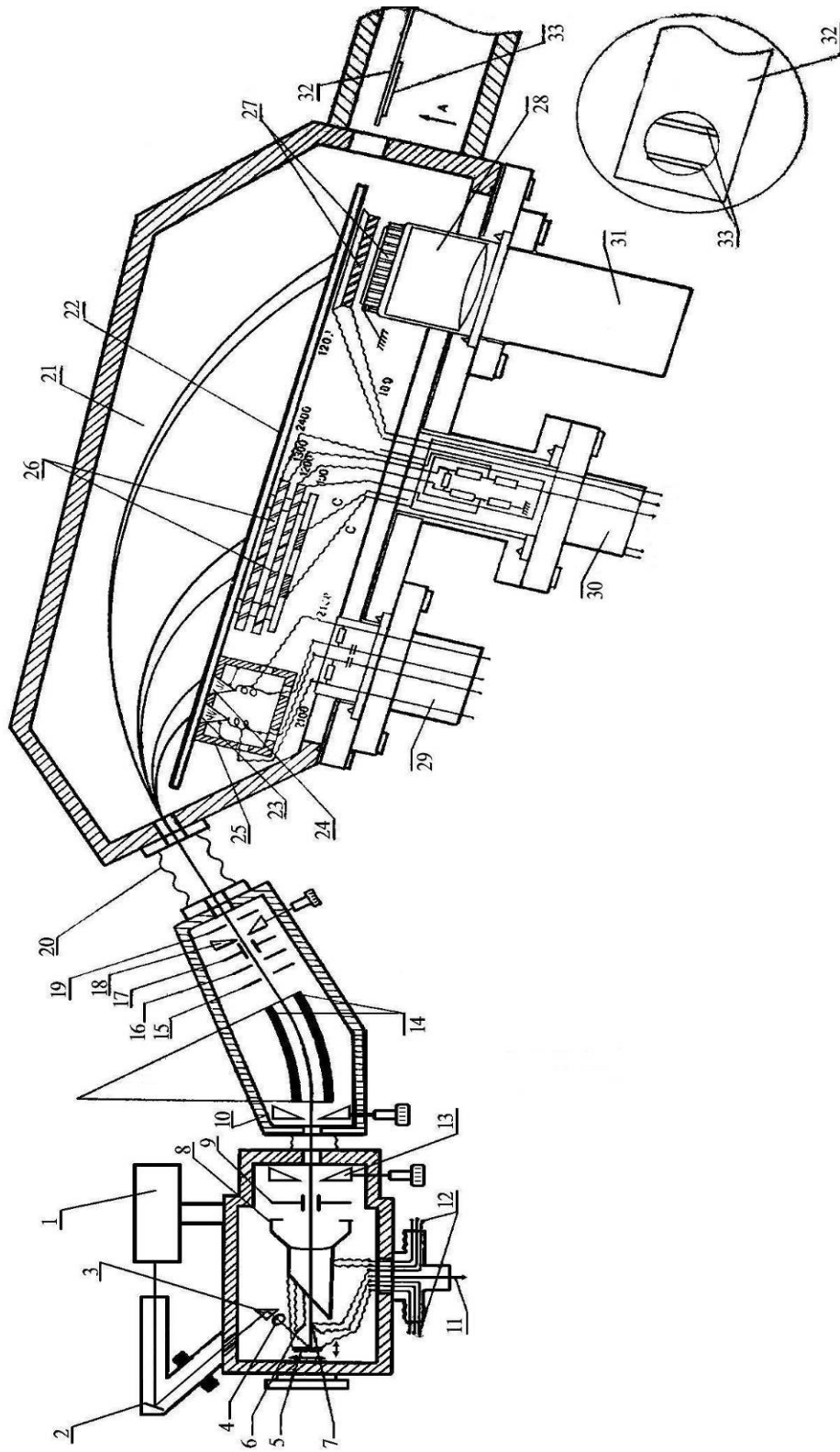
იონურ-იონურ წყაროებში ხდება ნიმუშის აორთქლება და შემდეგ ამ ორთქლის ბომბარდირება აჩქარებული იონების ნაკადით, ან წინასწარ აჩქარებული იონური სხივით უშუალოდ ნიმუშის ზედაპირზე ზემოქმედება, რის შედეგადაც მიიღწევა ნიმუშის შემადგენელი ნივთიერების იონიზაცია. ელექტრონულ-იონურ წყაროებში კი აორთქლებული ნიმუშის იონიზაციისათვის გამოიყენება აჩქარებული ელექტრონების ნაკადი. ნაპერწკალურ-იონური წყაროს მოქმედების პრინციპი დამყარებულია ელექტრულ განმუხტვაზე ვაკუუმში. საკვლევი ნიმუშისაგან ამზადებენ ელექტროდებს, რომლებზეც შემდგომში ახდენენ განმუხტვას. წარმოქმნილი ნაპერწკალი ელექტროდის ზედაპირზე იწვევს საკვლევი ნიმუშის ატომების იონიზაციას, რის შემდეგაც ხდება მათი აჩქარება და შემდგომი ანალიზი. ლაზერულ-იონურ წყაროებში კი ნიმუშის იონიზაცია მიიღწევა ნიმუშის ზედაპირზე მძლავრი ლაზერის სხივის მოქმედებით, რომელიც იწვევს ნიმუშის აორთქლებას და შემდეგ მის იონიზაციას.

მას-სპექტრომეტრები ასევე განსხვავდებიან მარეგისტრირებელი სისტემის რეგისტრირების მეთოდებით. არსებობს ელექტრული და ფოტო-ემულსიური მეთოდები. პირველში იონების აღრიცხვა ხდება ელექტრული დეტექტორებით, როგორცაა: ფარადის

ცილინდრი, მეორადი ელექტრონული გამამრავლებლები, მიკროარხული ფირფიტები, პოზიციურად მგრძობიარე დეტექტორები, სცინტილაციური მთვლელები და სხვა. ეს მეთოდი გამოირჩევა განსაკუთრებით მაღალი მგრძობიარობითა და შედეგების ანალიზის სისწრაფით, რადგან ამ ტიპის დეტექტორებით მიღებული ინფორმაციის დამუშავება ხდება კომპიუტერული სისტემებით.

ფოტო-ემულსიური მეთოდები გულისხმობს იონთა რეგისტრაციას ფოტოფირით. ფირზე არსებული ფოტო-ემულსია შედგება $ArBr$ - ის მოლეკულებისაგან, რომლებიც იონების დაჯახების შედეგად დისოცირდებიან და ფირის შემდგომი გამჟღავნების შემდეგ ამ ადგილებზე შეიმჩნევა გაშავება, რომლის ხარისხიც პირდაპირპროპორციულია დაცემული იონების რიცხვის. ამ მეთოდით შესაძლებელია ნიმუშის პრაქტიკულად მთლიანი მასური სპექტრის დამზერა ერთდროულად, რაც ამ მეთოდის უდავო უპირატესობაა. თუმცა, ფოტოფირს გააჩნია გარკვეული ნაკლიც: ფოტოფირზე მოხვედრილი იონების კვალი - გაშავება მხოლოდ იმ შემთხვევაში ხდება შესამჩნევი, როცა მასზე დაცემული იონების რიცხვი 10^4 - 10^5 -ის რიგისაა 1mm^2 - ზე.

ჩვენ სამუშაოში გამოყენებული იყო მატაუხ-ჰერცოგის ტიპის ორმაგი ფოკუსირების მას-სპექტრომეტრი EMAL-2 , რომლის ზოგადი სქემაც მოცემულია (ნახ.6).

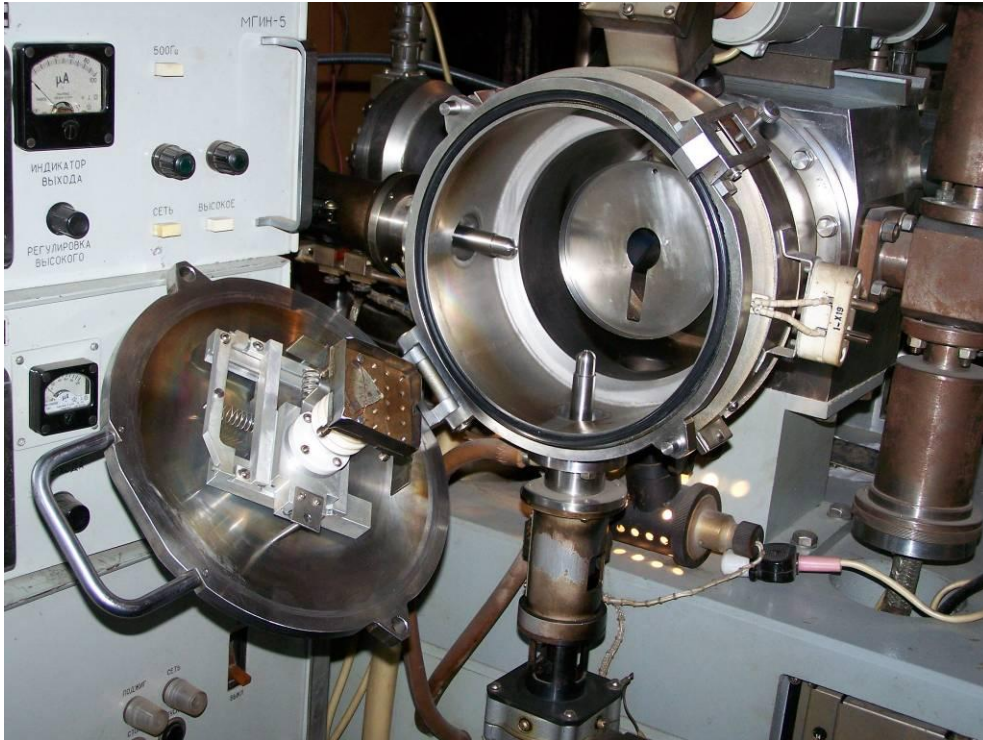


ნახ.6 მას-სპექტრომეტრის ზოგადი სქემა



ნახ.7 ორმაგი ფოკუსირების მქონე მას-სპექტრომეტრის გარეგნული სახე

ნახ.7 - ზე.წარმოდგენილია მას-სპექტრომეტრი, რომელსაც გააჩნია ლაზერულ-იონური წყარო (ნახ.8), სადაც გამოყენებულია გიგანტური იმპულსის რეჟიმში მომუშავე ძონის (YAG) ლაზერი (1). მისი ტალღის სიგრძე შეადგენს 1.06 მიკრომეტრს (ინფრანითელი არე), მაქსიმალური ენერგია იმპულსში - 5×10^{-2} ჯ. გამოსხივების სიმძლავრე 10^{-8} – 10^{-9} წამიანი იმპულსის განმავლობაში აღწევს 5×10^6 ვტ-ს, ხოლო ენერგიის ნაკადის სიმკვრივე 10^8 – 10^{10} ვტ/სმ² ლაზერის სხივის კუთხური გაშლა 3×10^{-3} რადიანია. გამომავალი სიმძლავრის ფლუქტუაციები შეადგენს 10%.



ნახ.8 ЭМАЛ-2-ის ლაბორულ-იონური წყარო

2.3 ლაზერის სხივის ზემოქმედებით პლაზმის წარმოქმნისა და გავრცელების მექანიზმი იონურ წყაროში

ლაზერი წარმოადგენს მონოქრომატული სინათლის მძლავრ წყაროს, რომლის ტალღის სიგრძე ძირითადად მოთავსებულია ინფრარითელ და ხილულ დიაპაზონში, თუმცა ბოლო ხანებში შეიმჩნევა ტენდენცია უფრო მოკლეთალღიანი ლაზერების გამოყენებისა. ლაზერის სხივის დაფოკუსირებით შესაძლებელია მაღალი ინტენსივობისა და დიდი სიმძლავრის მქონე გამოსხივების მიღება (10^8-10^{15} ვტ/სმ²) ნივთიერებაზე ასეთი გამოსხივების მოქმედებისას შეიძლება მრავალი ფიზიკური პროცესის დამზერა. მათგან ერთ-ერთი ყველაზე მნიშვნელოვანი პროცესია ნივთიერების ზედაპირზე მაღალტემპერატურული, მაღალი სიმკვრივის პლაზმის მიღება [10, 11].

პლაზმის წარმოქმნისას ნიშუპის ზედაპირზე (5) (ნახ.7) არსებული წნევის დიდი გრადიენტის გამო პლაზმა ზედაპირიდან გამოიტყორცნება და ხდება მისი აეროდინამიკური

გათართობა. პლაზმის გაცხელებისა და მისი შემდგომი გათართობის ხასიათის განმსაზღვრელი ძირითადი პარამეტრია t_p ლაზერის იმპულსის ხანგრძლივობისა და პლაზმის აეროდინამიკური გათართობის t_L დროებს შორის თანაფარდობა.

პლაზმის წარმოქმნისა და მისი გავრცელების ადრეულ სტადიებზე დაკვირვებებმა აჩვენა, რომ ამ პროცესში შეიძლება გამოვეყნოთ სამი ზონა, რომლებიც განსხვავდებიან ნაწილაკთა სიმკვრივითა და აეროდინამიკური მოძრაობის ხასიათით: I ზონა - ეს არის მაღალი ტემპერატურის მქონე პლაზმის ბირთვი, რომელშიც შთაინთქმება ლაზერის გამოსხივება. II ზონა - აჩქარების ზონაა, რომელშიც ხდება სითბური ხასიათის ენერჯის გადასვლა ნაწილაკთა მიმართული აეროდინამიკური მოძრაობის კინეტიკურ ენერჯიაში და III ზონა, სადაც ნაწილაკთა სიჩქარე ასიმპტოტურად უახლოვდება ზღვრულ მნიშვნელობას და პლაზმა მნიშვნელოვნად ცივდება.

პლაზმის ერთერთი ძირითადი პარამეტრია ელექტრონების ტემპერატურა T_e . ჩვენს შემთხვევაში საქმე გვაქვს პლაზმასთან, რომელშიც ელექტრონ-იონური რელაქსაციის დრო ნაკლებია პლაზმის სიცოცხლის ხანგრძლივობაზე, ამდენად, შეიძლება ჩაითვალოს, რომ ელექტრონული და იონური ტემპერატურები დაახლოებით ერთნაირია $T_e \cong T_i$ ელექტრონული ტემპერატურა T_e დამოკიდებულია ლაზერის სხივის სიმძლავრეზე როგორც $T_e \sim q^{4/9}$, სადაც q წარმოადგენს ლაზერის სხივის სიმძლავრეს და როგორც წესი ეს ტემპერატურა იცვლება 10-დან 100 ელექტრონვოლტამდე გამოსხივების სიმძლავრის $10^9 - 10^{11}$ ვტ/სმ² შუალედში. ასეთი ლაზერული პლაზმა შედგება ნეიტრალური და დამუხტული ნაწილაკებისაგან, რომელთა მიმართული მოძრაობის კინეტიკური ენერჯიები ათეული კილოელექტრონვოლტის რიგისაა, ასეთი ენერჯია კი მნიშვნელოვნად აღემატება იმ სითბურ ენერჯიას, რომელიც პლაზმაში გვაქვს. ეს ფაქტი მოწმობს იმაზე, რომ პლაზმაში მიმდინარეობს რთული პროცესები, რომლებიც უზრუნველყოფს იონთა აჩქარებას აღნიშნულ ენერჯიამდე.

ლაზერულ პლაზმაში ნაწილაკების აჩქარების ერთერთ მექანიზმს წარმოადგენს მასში არსებული ელექტრონების ხარჯზე კოლექტიური აჩქარების პროცესი. პლაზმაში დიდი რაოდენობით მაღალენერგეტიკული ელექტრონების არსებობა მნიშვნელოვან გავლენას ახდენს იონების ენერგეტიკული სპექტრის ფორმირებაზე, მიუხედავად ამ ნაწილაკების მასებს შორის დიდი განსხვავებისა.

პლაზმაში მიმდინარე პროცესებიდან ასევე მნიშვნელოვანია დამუხტული ნაწილაკების რეკომბინაციის პროცესი. რეკომბინაციის მაღალი ხარისხის გამო პლაზმის სიცოცხლის ხანგრძლივობა ძალიან მცირეა. ამას მოწმობს ის ფაქტი, რომ პლაზმა აგრძელებს არსებობას მხოლოდ 10-9 წამის განმავლობაში ლაზერის იმპულსის შეწყვეტის შემდეგ [11].

პლაზმის პროდუქტების კუთხური გავრცელების მახასიათებლების შესწავლა გვაძლევს საშუალებას დავაზუსტოთ და განვსაზღვროთ მექანიზმი ძირითადი პროცესებისა – იონიზაცია, რეკომბინაციის სტრუქტურა და ნაწილაკთა აჩქარება. მიღებული კუთხური და ენერგეტიკული განაწილებით განისაზღვრება ლაზერული პლაზმის გავრცელების ძირითადი თავისებურებები:

ა) ნაწილაკების გავრცელება ხდება ნიმუშის ზედაპირის მართობულად და სიმეტრიულია ამ ზედაპირის ნორმალის მიმართ.

ბ) ნაწილაკების კუთხური გაშლა მცირდება იონების მუხტის ზრდასთან ერთად, რაც მიუთითებს იონების ელექტროსტატიკური აჩქარების ეფექტზე.

ლაზერის სხივით მიღებულ პლაზმას აქვს ერთი საინტერესო თვისება, რაც ლაზერულ-იონურ წყაროებს გარკვეულ უპირატესობას ანიჭებს სხვა წყაროებთან შედარებით: ნიმუშის ზედაპირზე წარმოქმნილი პლაზმის ტემპერატურა ძალიან უმნიშვნელოდ არის დამოკიდებული ნიმუშის ნივთიერებაზე და პრაქტიკულად ერთნაირია ლითიუმიდან ვოლფრამამდე ნებისმიერი ელემენტისათვის. ეს აიხსნება შემდეგნაირად: მაღალი თანრიგის ელემენტებს გააჩნიათ იონიზაციის შედარებით დიდი პოტენციალები, ამიტომ ლაზერის სხივის ენერჯის უფრო მეტი ნაწილი იხარჯება მათ იონიზაციაზე. მაგრამ პლაზმის

მიერ ლაზერის გამოსხივების შთანთქმის კოეფიციენტი პირდაპირპროპორციულია ნივთიერების რიგობრივი ნომრის კვადრატისა, ასე რომ, ამ ორი გარემოებით გამოწვეული ეფექტები ერთმანეთს აკომპენსირებს და პლაზმის ტემპერატურა პრაქტიკულად აღარაა დამოკიდებული იონების მასაზე და მუხტზე.

ლაზერულ-იონური წყაროს ძირითადი პარამეტრი, რომელიც ახდენს გავლენას იონური კონის მიღების სიზუსტესა და განმეორადობაზე, არის ლაზერის სხივის ენერჯის ნაკადის სიმკვრივე. მაგალითად, გამოსხივების 10^6-10^7 ვტ/სმ² სიმკვრივის დროს შეიმჩნევა ნიმუშიდან აორთქლებული ელემენტების სელექტიურობა, გარდა ამისა, წარმოქმნილი პლაზმის შედარებით დაბალი ტემპერატურა იწვევს მისი შემადგენელი ელემენტების იონიზაციის არათანაბარ ალბათობას. ამ შემთხვევაში მიღებულ მასურ სპექტრებში დაბალი იონიზაციის პოტენციალის მქონე ელემენტების კონცენტრაცია შეიძლება მომატებული იყოს ერთი რიგით, უფრო მაღალი იონიზაციის პოტენციალის მქონე ელემენტებთან შედარებით. ამ პრობლემის გადაჭრა შეიძლება ლაზერის სიმძლავრის ნაკადის გაზრდით, რაც მიიღწევა ლაზერის სიმძლავრის გაზრდით, ან ლაზერის სხივის დაფოკუსირებით ნიმუშის ზედაპირის უფრო მცირე ფართობზე. მაგრამ, ლაზერის სიმძლავრის გაზრდა შემოსაზღვრულია მისი კონსტრუქციის მდგრადობითა და მის გაცეხასთან დაკავშირებული პრობლემებით, ხოლო მისი სხივის ფოკუსირების შესაძლებლობა – ლაზერის ტალღის სიგრძით. ამდენად, ამ ფაქტებიდან გამომდინარე, მას-სპექტრომეტრული გამოკვლევებისათვის ნაკადის ოპტიმალურ დიაპაზონად ითვლება 10^9-10^{10} ვტ/სმ².

2.4 ელექტროსტატიკური ანალიზატორი

ელექტროსტატიკური ანალიზატორი (14) (ნახ.6) წარმოადგენს სფერული ფორმის კონდენსატორს, რომლის პოლუსებს შორის მოძრაობენ აჩქარებული იონები. პოლუსებზე მოდებულია მაფოკუსირებელი $V_{ან}$ დაბვა, რომელიც ამაჩქარებელ $V_{ამ}$ დაბვასთან შემდეგნაირადაა დამოკიდებული:

$$V_{ამ} = 10 V_{ან}$$

ანალიზატორის მაფოკუსირებელი დაბვა უზრუნველყოფს იონური კონის გადახრას $31^{\circ}50'$ კუთხით ჰორიზონტალურ სიბრტყეში და მის მოძრაობას 20სმ რადიუსის მქონე წრეწირის რკალზე. ამის შემდეგ იონური კონა ხვდება მაგნიტურ ანალიზატორში.

2.5 მაგნიტური ანალიზატორი

მაგნიტურ ანალიზატორში (21) არსებული ერთგვაროვანი მაგნიტური ველი, რომლის მაგნიტური ინდუქციის ვექტორი იონების მოძრაობის მიმართულების მართობულია, მასში მოხვედრილ იონებს გადახრის 90° –ით და აფოკუსირებს ფოტოფირზე, რომელიც მოთავსებულია 45° კუთხით მაგნიტურ ველში სხივის შესვლის მიმართულებასთან. სხვადასხვა $\frac{m}{e}$ ფარდობის მქონე იონები ერთგვაროვან მაგნიტურ ველში მოძრაობენ სხვადასხვა რადიუსის ტრაექტორიებზე, რომელთა რადიუსები პირდაპირპროპორციულია იონების ამაჩქარებელი ელექტრული დაბვის და უკუპროპორციულია მაგნიტური ველის დაძაბულობის:

$$R = K \frac{m V}{H}$$

სადაც: V ნაწილაკის მიერ ამაჩქარებელ ველში გავლილი პოტენციალთა სხვაობაა.

H მაგნიტური ველის დაძაბულობა.

აღნიშნული ელექტრული და მაგნიტური ფოკუსირება წარმოადგენს იონური სხივის ორმაგი ფოკუსირების სისტემას, რაც საშუალებას იძლევა ერთი და იგივე ელემენტის, მაგრამ განსხვავებული სიჩქარეების მქონე იონური სხივების დაფოკუსირება მოხდეს ერთ წერტილში.

2.6 მარეგისტრირებელი სისტემა

მაგნიტური ანალიზატორის ფოკალურ სიბრტყეში, სადაც ხდება იონური სხივის ფოკუსირება, მოთავსებულია “ILFOLD Q-2” ტიპის ფოტოფირფიტა (22), რომლითაც ხდება იონთა რეგისტრირება. მაგნიტური ველის ძალწირების გასწვრივ ფირის გადამანაცვლებელი მოწყობილობა იძლევა 25 მასური სპექტრის გადაღების საშუალებას. ფირფიტის ექსპოზიციის დრო განისაზღვრება სრული იონური დენით.

2.7 გარჩევისუნარიანობა

მას-სპექტრომეტრის გარჩევის უნარიანობა $A = \frac{M}{\Delta M}$ განისაზღვრება როგორც მასური რიცხვი M , რომლისთვისაც მასსპექტრალური ხაზის სიგანე გამოსაზღვრულია მასურ ერთეულებში ΔM , ტოლი იქნება მასისა. გარჩევისუნარიანობის სიდიდე განისაზღვრება შემდეგი მოსაზრებიდან: ლაზერულ-იონური წყარო გარდა ერთმუხტიანი იონებისა, იძლევა მრავალმუხტიან იონებს და იონებს იმ მოლეკულებისა, რომელიც ნიმუშის შემადგენლობაშია. ამიტომ, ერთი და იგივე ადგილი მას-სპექტრში შეიძლება დაიკავოს რამოდენიმე სხვადასხვა სახის იონმა, რომელთაც ერთნაირი m/e ფარდობა ექნება. მაგალითად, მასური რიცხვის 28 შესაბამისი პროექცია მასურ სპექტრში შეიძლება დაიკავოს: ${}_{14}^{28}\text{Si}$, $1/2 {}_{26}^{56}\text{Fe}$, $1/3 {}_{34}^{84}\text{Se}$, $1/4 {}_{48}^{114}\text{Cd}$ და ა.შ. ასევე ${}_{7}^{14}\text{N}_2$, ${}_{6}^{12}\text{C} {}_{8}^{16}\text{O}$ და ა.შ. მოლეკულებმა.

დაბალი გარჩევისუნარიანობის სპექტრში შესაძლებელია გაურჩეველი ხაზების არსებობა, რაც აძნელებს სპექტრის გაშიფრვას. განსაკუთრებით ძნელდება ერთ იზოტოპიანი ელემენტების იდენტიფიკაცია.

მაღალი გარჩევისუნარიანობა კი, საშუალებას გვაძლევს გავაჩიოთ m/e ფარდობის ახლო მნიშვნელობების ხაზები.

გარჩევისუნარიანობა განისაზღვრება ფორმულით:

$$R_k = \frac{L(M_1 - M_2)}{(\delta k_1 + \delta k_2)(M_1 + M_2)} \quad (2.14)$$

სადაც, M_1 და M_2 - სარეგისტრაციო ელემენტების შესაბამისი მასებია, თანაც $M_1 > M_2$,

L - მასური რიცხვების M_1, M_2 შესაბამისი პიკების ღერძებს შორის მანძილი (მმ),

$\delta k_1, \delta k_2$ - შესაბამისად M_1 და M_2 მასების პიკების სიგანეა 505 ინტენსივობის დონეზე (მმ).

2.8 დისპერსია

დისპერსია D არის მანძილი მას-სპექტრზე ისეთ ორ M_1, M_2 მასის შესაბამის ხაზებს შორის, რომელთა ფარდობითი სხვაობა :

$$\gamma = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \quad (2.15)$$

ერთის ტოლია.

მატაუხ-ჰერცოვის გეომეტრიის მას-სპექტრიმეტრისათვის დისპერსია განისაზღვრება ფორმულით:

$$D = \frac{\gamma y}{2} \quad (2.16)$$

სადაც: y - არის მანძილი მაგნიტურ ველში იონების შესვლის წერტილიდან ფოტოფირფიტაზე არსებულ მას-სპექტრალურ ხაზამდე. იგი დაკავშირებულია მაგნიტურ ველში იონის მოძრაობის სიმრუდის რადიუსთან ფორმულით:

$$y = (2)^{1/2} a_m$$

ჩვეულებრივ დისპერსიას ითვლიან მასების ფარდობითი სხვაობით 1% - ზე. $y = 1/100$,
 მასინ $D = y/200/$

აქედან გამომდინარე, მას-სპექტრომეტრის დისპერსია განისაზღვრება მხოლოდ მაგნიტის ზომებით. ჩვეულებრივ, საწიროა დავაფიქსიროთ ფირფიტაზე ყველა ელემენტი Li - დან U - მდე.

მატაუხ-ჰერცოვის მას-სპექტრომეტრისათვის არსებობს y სიდიდის დამოკიდებულება მასაზე:

$$M = k y^2 \quad (2.17)$$

სადაც, k არის ხელსაწყოს მუდმივა. Li - ისათვის იგი 50 მმ - ის ტოლია. შესაბამისად ურანისათვის $y_u = 300$ მმ და ფოტოფირის სიგრძე გამოვა:

$$\Delta y = y_{Li} - y_U = 250 \text{ მმ}$$

მაშინ დისპერსია 1% მასათა სხვაობაზე $D_{\%} = 0,25 \div 1,25$ მმ.

2.9 მგრძნობიარობა

მას-სპექტრომეტრის მგრძნობიარობა ეწოდება მინარევის იმ უმცირეს კონცენტრაციას, რომელიც შეიძლება დაფიქსირდეს ნიმუშში. ამისათვის იყენებენ ნიმუშს ცნობილი შემადგენლობით და მინარევის კონცენტრაციის ჩვეულებრივი მეთოდის გამოყენებით გამოითვლიან ელემენტის უმცირეს კონცენტრაციას, რომლის შესაბამისი მას-სპექტრალური ხაზი აღმოჩენის ზღვარზეა.

“ILFORD Q-2” - ტიპის ემულსიური ფოტოფირისათვის (რომელიც გამოიყენება მას-სპექტრის რეგისტრაციისათვის) მას-სპექტრალური ხაზის გამომჟღავნების ზღვარია $10^4 - 10^5$ დაცემული იონი ყოველ მმ^2 - ზე. შესაბამისად, თუ მინარევის კონცენტრაცია 10^{-7} ატ % - ია აუცილებელია, რომ ფოტოფირს მოხვდეს იონები ინტეგრალური მუხტით 10^{-7} კულონი. ამასთანავე მხედველობასი მიიღება ფირფიტის უწყვეტი ფონის არსებობა, რაც გამონვეულია ნარჩენი გაზის მოლეკულებთან იონების დაჯახების პროცესით. უწყვეტი ფონი დამოკიდებულია მას-სპექტრომეტრის ანალიზატორში არსებულ წნევაზე. 10^{-7} ატმ %

მგრძობიარობის მისაღწევად ანალიზატორის არეში ვაკუუმი არ უნდა იყოს 10^{-7} p_a - ზე ნაკლები.

თავი 3. 3.1 მეტეორიტები და მათი მნიშვნელობა

ჩვენი სამუშაოს მიზანს წარმოადგენს ლითიუმის იზოტოპური ფარდობების შესწავლა მეტეორიტების მიკრომოცულობებში. როგორც ზემოთ იყო აღნიშნული, ელემენტთა წარმოქმნის მოდელელებში არსებობს მსუბუქი ბირთვების წარმოქმნის პრობლემა, ამ პრობლემის გადაჭრისათვის აუცილებელი ინფორმაცია (სამყაროში მიმდინარე პროცესებზე) კი კოსმოსში არსებულ სხეულებშია შემონახული. მათ შორის მეტად მნიშვნელოვანია მეტეორიტები, ის არამიწიერი წარმოშობის ობიექტები, რომლებიც თავისთავად აღწევენ დედამიწამდე და საშუალებას გვაძლევენ უშუალოდ გამოვიკვლიოთ მათი შემადგენლობა ლაბორატორიულ პირობებში. ისინი წარმოადგენენ უმცირესი ზომის მტვრის ნაწილაკების კონგლომერატს. თითოეული ნაწილაკი კი შეიძლება წარმოქმნილი იყოს სამყაროს ევოლუციის სხვადასხვა ეტაპზე. ის ფაქტი, რომ მეტეორიტის ცალკეული ნიმუშის ფარგლებში არსებობს სხვადასხვა წარმოშობის ფრაგმენტები, მინერალების ჩანართები და არაჰომოგენური მარცვლებიც კი, მიუთითებს მეტეორიტის შემადგენელი ნაწილების არა მხოლოდ წარმოქმნის განსხვავებულ პირობებზე, არამედ დასტურია იმისა, რომ ნივთიერების გადატანა ხორციელდებოდა გაზურ-მტვრული ნისლოვანის განვითარების როგორც ადრეულ, ასევე ბევრად გვიან ეტაპებზე, ანუ როგორც მიკრონების ზომის ნაწილაკების დონეზე, ასევე კონსოლიდირებული სხეულების ცალკეული ფრაგმენტების დონეზე (ნახ.9). ამდენად, მათი ელემენტური და იზოტოპური ანალიზი უმნიშვნელოვანეს ინფორმაციას იძლევა სამყაროს წარმოქმნისა და მისი შემდგომი განვითარების პროცესებზე.

მეტეორიტების შემადგენლობის დადგენას დიდი მნიშვნელობა აქვს აგრეთვე დედამიწის შესწავლის თვალსაზრისითაც. არსებობს მოსაზრება, რომ ნივთიერება დედამიწის შიგნით საგრძობლად განსხვავდება ზედაპირული ნიმუშებისაგან. უშუალოდ დაკვირვებები

ჯერჯერობით შესაძლებელია მხოლოდ ისეთ ნიმუშებზე, რომლებიც რამდენიმე კილომეტრ სიღრმეზეა დედამიწიდან (რაც დედამიწის რადუსის მხოლოდ ერთი მეათასედია). აქედან ცხადია, რომ თუ რატომ ეძლევა ესოდენ დიდი მნიშვნელობა ხონდრიტული მეტეორიტების ქიმიურ ანალიზს.

ხონდრიტული მეტეორიტი ქვის მეტეორიტის ისეთი სახეა, რომელიც შედგება მილიმეტრის რიგის მარცვლებისგან ცალკეული ხონდრები კოსმოსური ნივთიერების კონდენსაციის უშუალო პროდუქტია. ასეთ პატარა მოცულობაში თითქმის შეუძლებელია მომხდარიყო მნიშვნელოვანი გაყოფა. ამიტომაც ხონდრიტების შემადგენლობა ითვლება კონდენსირებული კოსმოსური ნივთიერების (დედამიწა, მთვარე და სხვა) საშუალო შემადგენლობად.

უკანასკნელ წლებში განსაკუთრებით ინტენსიურად დაიწყო მეტეორიტებში იზოტოპური ფარდობების შესწავლა, რადგან მასთან დაკავშირებულია თანამედროვე მეცნიერების ისეთი კარდინალური საკითხები, როგორცაა ელემენტების წარმოქმნა, მათი ასაკი, დედამიწის ასაკი და მისი განვითარების ეტაპები, მეტეორიტების წარმოქმნა, მათი ასაკი და სხვა.

ცნობილია, რომ ელემენტების იზოტოპები ქიმიური თვისებებით ერთმანეთისგან თითქმის არ განსხვავდებიან. რავალი ცდით დადგენილია, რომ მათი საგრძნობი გაყოფა ბუნებრივ პირობებში შეუძლებელია. ამიტომ მიუხედავად რთული ქიმიური პროცესებისა, რომლებიც მიმდინარეობდა პროტოპლანეტის კონდენსაციიდან დედამიწის დღევანდელ სახემდე, ელემენტის იზოტოპური ფარდობა საგრძნობლად არ შეცვლილა.

ცდები გვიჩვენებს, რომ იზოტოპური ფარდობების ცვლილების ერთადერთი წყაროა ბირთვული პროცესები - რადიოაქტიურობა და ბირთვული რეაქციები.

რადიოაქტიურობის აღმჩენამ დიდი გარდატეხა მოახდინა კაცობრიობის მსოფლმხედველობაში. თვით რადიოაქტიური დაშლის ფაქტი (ერთი ელემენტი მთლიანად გადადის მერეში) ცალსახად გვიჩვენებს, რომ ეს ელემენტი უნდა შექმნილიყო (რასაც აქვს დასასრული, შეუძლებელია არ ჰქონოდეს დასაწყისი). ეს იმაზე მეტყველებს, რომ იყო დრო,

როდესაც დედამინა, მზე და გალაქტიკა. როდის და როგორ მოხდა გალაქტიკის იმ ნაწილის არმოქმნა, რომელშიდაც ჩვენ ვიმყოფებით? ეს კოსმოგონიის ძირითადი საკითხია.

თანამედროვე ბიოვული ასტროფიზიკის განვითარება დიდა არის დამოკიდებული მეტეორიტების იზოტოპური და ელემენტური შემადგენლობის განსაზრვრაზე. აღნიშნული გამოკვლევები დაწყებულია რამოდენიმე ათეული წლის წინ და მას შემდეგ განუწყვეტლივ მიმდინარეობს ანალიზის მეთოდის სრულყოფა.



ნახ.9 კვლევის ობიექტებს წარმოადგენენ სხვადასხვა ტიპის მეტეორიტები: “თბილისი1” და “თბილისი2” რომელთა ანალიზი ხდება 10^{-11} გრ. ფრაგმენტაციის დონეზე.

3.2 მიღებული შედეგები და მათი ანალიზი

მოცემული ექსპერიმენტი ჩავატარეთ ბირთვული ფიზიკის ლაბორატორიაში არსებულ მატაუხ-ჰერცოგის ტიპის ორმაგი ფოკუსირების მქონე მას-სპექტრომეტრზე ლაზერული იონური წყაროთი. ექსპერიმენტის საშუალებით მიღებული შედეგები საკმაოდ მნიშვნელოვანი და საინტერესოა მეცნიერული თვალსაზრისით.

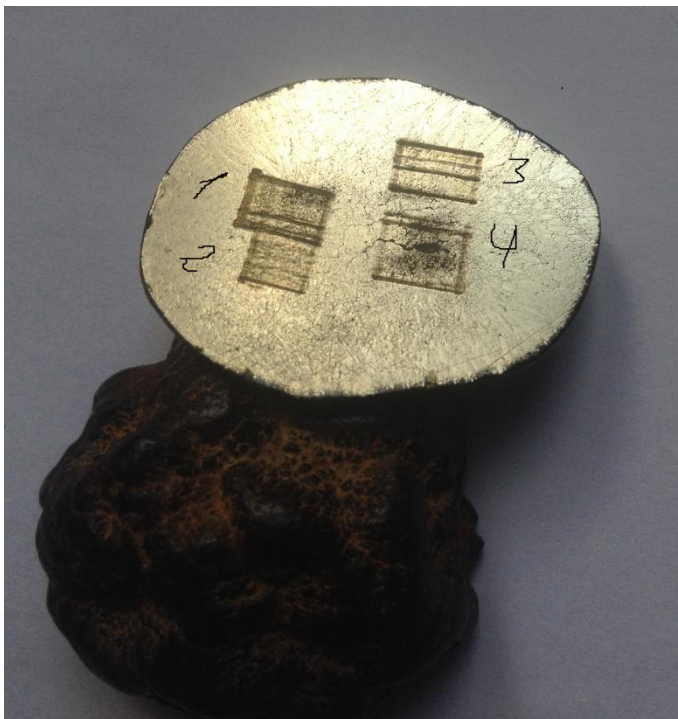
ჩვენი პირველადი მიზანი იყო, მეტეორიტულ ნიმუშებში მსუბუქი ელემენტების იზოტოპური ფარდობების შესწავლა და ამ გზით გარკვეული დასკვნების გაკეთება ნუკლეოსინთეზის ერთიანი თეორიისა და კერძოდ, X-პროცესის მოდელის ფარგლებში.

აღნიშნული მეთოდით გამოვიკვლიეთ 2 მეტეორიტის 7 საკვლევი ობიექტი. მათ შორის პირველი ქართული მეტეორიტები: "თბილისი-1" და "თბილისი-2" ნახ.9, ექსპერიმენტები მიმდინარეობდა ლითიუმის და ბორის ფრაგმენტაციის $10^{-10} - 10^{-11}$ გრამის ღონეზე, რაც შეესაბამება მეტეორიტის ნიმუშის 1 მიკროგრამში არსებულ ლითიუმის და ბორის რაოდენობას.

ცხრილში #1 წარმოდგენილია ლითიუმის იზოტოპური ფარდობების გაზომვის შედეგები მეტეორიტისათვის "თბილისი-1" და , ჯამში 4 სხვადასხვა მიკრომოცულობისათვის.

ცხრილი #1 ლითიუმის საშუალო იზოტოპური ფარდობა მეტეორიტის
 "თბილისი-1" ოთხი მიკრო მოცულობისათვის

#	იონების ჯამური ანალიზური სიგნალები		ფარდობა $\frac{{}^7\text{Li}}{{}^6\text{Li}}$	დისპერსია
	${}^7\text{Li}$	${}^6\text{Li}$		
1	143675	11568	12.42	4.7×10^{-3}
2	131129	10524	12.46	2.9×10^{-3}
3	151417	12094	12.52	3.5×10^{-3}
4	150831	12115	12.45	4.3×10^{-3}



ნახ.10 მეტეორიტი "თბილისი - 1

ცხრილი #2 ბორის საშუალო იზოტოპური ფარდობა მეტეორიტის
 "თბილისი-1" ოთხი მიკრო მოცულობისათვის

#	იონების ჯამური ანალიზური სიგნალები		ფარდობა $^{11}_5\text{B}/^{10}_5\text{B}$	დისპერსია
	$^{11}_5\text{B}$	$^{10}_5\text{B}$		
1	50791	12541	4.0	4.3×10^{-3}
2	45447	11139	4.08	1.7×10^{-3}
3	39459	10015	3.94	3.9×10^{-3}
4	40719	10231	3.98	3.6×10^{-3}

როგორც ცხრილი #1 და #2 - დან ჩანს, მიუხედავად იმისა, რომ ფრაგმენტაციის დონე დაფიქვანეთ მიკროგრამებამდე, ბორის იზოტოპური ფარდობების ვარიაციები არ აღემატებოდა 1.5%-ს ხოლო ლითიუმის იზოტოპური ფარდობების ვარიაციები ოთხივე საკვლევე ზონაში საშუალოდ 0.4% და არ აღემატება 0.64%.

აღსანიშნავია მეორე მეტეორიტის ნიმუშში იზოტოპური გაზომვების შედეგები. ეს არის პირველი ქართული მეტეორიტი, ვინაიდან ის ნაპოვნია საქართველოს ტერიტორიაზე და მათ ჩაუტარდა ელემენტური ანალიზი. როგორც ყოველთვის მეტეორიტის შემცველობაში, გარკვეულწილად არის მომატებული ზოგიერთი ელემენტის მასური წილი და მცირე სიდიდით შეცვლილია მათი იზოტოპური ფარდობები დედამიწის ნიმუშებთან შედარებით.

ცხრილი #3

ლითიუმის საშუალო იზოტოპური ფარდობა მეტეორიტის

"თბილისი -2" - ის სამი მიკრომოცულობისათვის

№	იონების ჯამური ანალიზური სიგნალები		ფარდობა $\frac{{}^7\text{Li}}{{}^6\text{Li}}$	დისპერსია
	${}^7\text{Li}$	${}^6\text{Li}$		
გული	130379	10561	12.44	4.1×10^{-3}
ცენტრი	109461	8921	12.27	2.3×10^{-3}
ქერქი	142197	11394	12.48	1.7×10^{-3}



ნახ.11 მეტეორიტი "თბილისი-2"

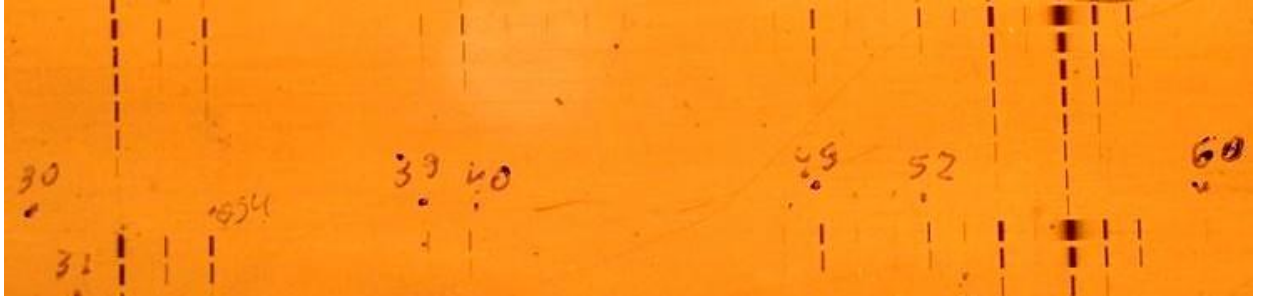
ცხრილი #4

ბორის საშუალო იზოტოპური ფარდობა მეტეორიტის
"თბილისი -2" - ის სამი მიკრომოკულობისათვის

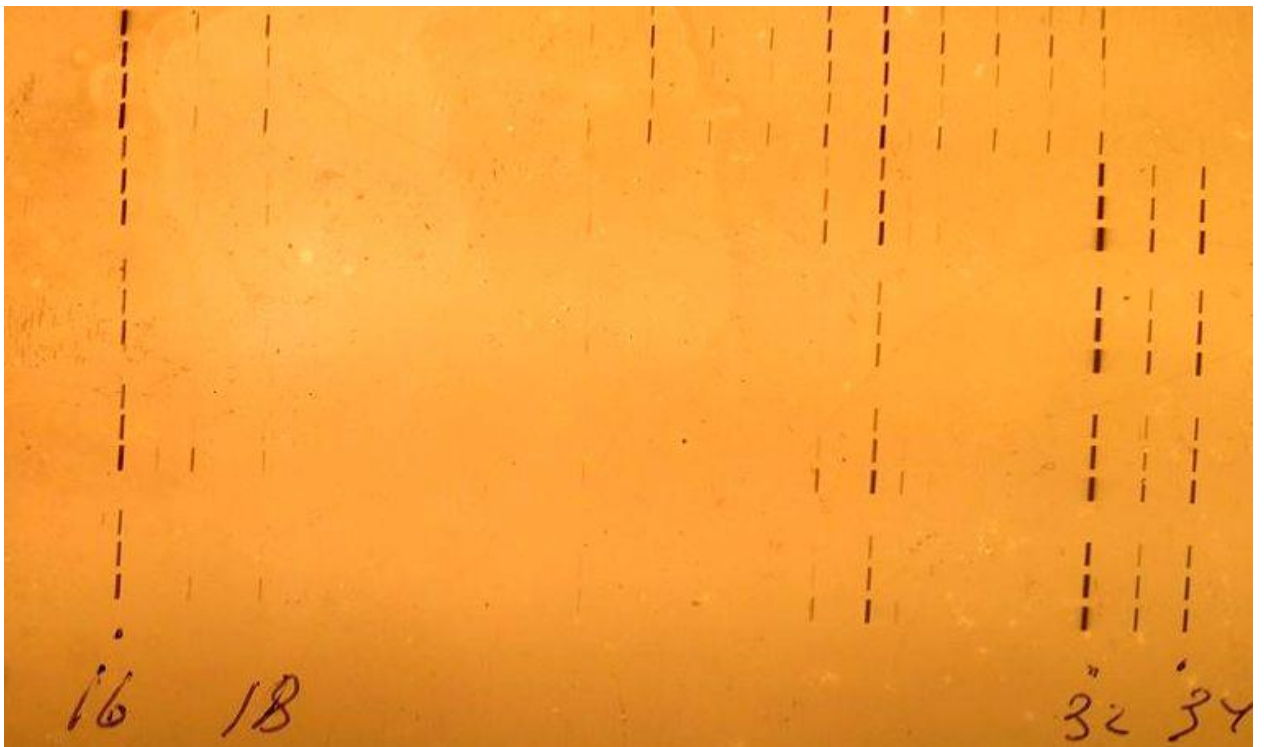
№	იონების ჯამური ანალიზური სიგნალები		ფარდობა $^{11}_5\text{B}/^{10}_5\text{B}$	დისპერსია
	$^{11}_5\text{B}$	$^{10}_5\text{B}$		
გული	45854	11350	4.04	3.6×10^{-3}
ცენტრი	52704	13309	3.96	3.1×10^{-3}
ქერქი	31508	7685	4.10	2.8×10^{-3}

მეტეორიტი "თბილისი - 2" ის კვლევის მიზანი იყო იზოტოპური ფარდობების ცვლილების დაკვირვება ნიმუშის გულიდან პერიფერიებისკენ ანუ ქერქისკენ და ეგრედწოდებულ გარდამავალ სეგმენტზე - შერევის ადგილზე. ცენტრში ლითიუმის იზოტოპური ფარდობის ფარიაციები 1.84% მის ბუნებრივ გავრცელებასთან მიმართებაში, ხოლო ბორის შემთხვევაში იზოტოპური ფარდობები ცენტრი - 0.75% , გული - 1% , ქერქი - 2.5% - იანი ვარიაციებით გამოირჩევა მის ბუნებრივ გავრცელებასთან.

კვლევის პერიოდში ჩვენი ყურადღება მიიქცია რამოდენიმე ელემენტისათვის დაფიქსირებულმა იზოტოპურმა ფარდობებმა, კერძოდ ტიტანის და უანგბადის იზოტოპურმა ანომალიებმა. ნახ.12 და ნახ.13.



ნახ.12 ტიტანის იზოტოპური ანომალიები, ^{48}Ti - ^{49}Ti შესაბამის მას-სპექტრალური ხაზები.



ნახ.13 უანგბადის იზოტოპური ანომალიები, ^{16}O , ^{17}O , და ^{18}O შესაბამის მას-სპექტრალური ხაზები.

ეს ნიმუში მკვეთრად განსხვავდებოდა დედამიწაზე არსებული ნიმუშებისაგან, მაგრამ ეს ანომალიები დაფიქსირდა მხოლოდ გარკვეულ მასურ სპექტრებზე, ანუ მეტეორიტის ზოგიერთი ნიმუშის ცალკეულ წერტილებში, რაც იმის მანიშნებელია, რომ ამ დარღვევებს ადგილი ექონდა მეტეორიტის მხოლოდ გარკვეულ არეებში. მოცემული შედეგებით, მეტეორიტის ქერქსა და შუაგულს შორის არსებულ არეში დაფიქსირდა მკვეთრი

განსხვავებები აღნიშნულ იზოტოპურ ფარდობებში დედამიწის ნიმუშებში არსებულ იზოტოპურ ფარდობებთან შედარებით [15, 16]. ასე მაგალითად: იზოტოპი ^{48}Ti , რომელიც დომინირებს დედამიწის ნიმუშებში და მისი წილი შეადგენს 78% -ს, აღნიშნულ ნიმუშში აღმოჩნდა უმნიშვნელო რაოდენობით, მაშინ როდესაც ^{49}Ti იზოტოპი, რომლის შემცველობაც დედამიწის ნიმუშებში არის 5.5%, ამ ნიმუშში აღმოჩნდა სხვებთან შედარებით ყველაზე მეტად გავრცელებული. მეტეორიტის ქერქში ასეთი ანომალიები არ დაფიქსირებულა, ხოლო ცენტრალური არის ძირითადი შემადგენელი აღმოჩნდა ^{49}Ti იზოტოპი, რაც მეტად უჩვეულო შედეგია როგორც მეტეორიტებისათვის ასევე დედამიწის ნიმუშებისათვისაც. რაც შეეხება ^{46}Ti , ^{47}Ti და ^{50}Ti იზოტოპებს, რომელთა გავრცელება დედამიწის ნიმუშებში შეადგენს 7.83%, 7.28% და 5.34% შესაბამისად, მათი გავრცელება ნიმუშში იმდენად მცირე აღმოჩნდა, რომ მოცემული ექსპოზიციების პირობებში, ფოტოფირზე არც ერთის შესაბამისი კვალი არ დაფიქსირდა, **ცხრილი #5**.

ცხრილი #5 მეტეორიტში "თბილისი - 2"-ში დამზერილი
 იზოტოპური ანომალიები ზოგიერთი ელემენტისათვის

იზოტოპი	გავრცელება მეტეორიტებში	ბუნებრივი გავრცელება
^{16}O	59.3%	99.759%
^{17}O	11.6%	0.037%
^{18}O	29.1%	0.204%
^{48}Ti	21.5%	73.94%
^{49}Ti	78.5%	5.51%

აღნიშნულ ანომალიებზე დაბეჭითებით მსჯელობისათვის აუცილებელია სტატისტიკის დაგროვება, საჭიროა განმეორდეს გაზომვები, შემონმდეს ყველა საეჭვო არამინიერი ობიექტი, რომელიც ხელმისაწვდომია.

დასკვნა

აღნიშნული მეთოდით შესწავლეთ მსუბუქი ბირთვების წარმოქმნის პრობლემა მეტეორიტების კვლევის მას-სპექტრომეტრიული ანალიზის საშუალებით. ექსპერიმენტი ჩავატარეთ ბირთვული ფიზიკის ლაბორატორიაში არსებულ ორმაგი ფოკუსირების მას-სპექტრომეტრზე ლაზერულ-იონური წყაროთი, ნიმუშის ფრაგმენტაციის გაზრდილი რიგით.

როგორც აღმოჩნდა, ამ დონეზე ლითიუმის იზოტოპური ფარდობების ვარიაციები შეიმჩნევა პირველ მეტეორიტში 0.64% და მეორე მეტეორიტში 1.84%-ის ფარგლებში, ხოლო ბორის იზოტოპური ფარდობების ვარიაციები 0.75%, 1%, 2.5% - ის ფარგლებში, რაც იმის მანიშნებელია, რომ საჭიროა მეტეორიტების კვლევა ფრაგმენტაციის უფრო დაბალ დონეზე. ამის გარდა, ექსპერიმენტებში დაფიქსირდა ზოგიერთი ელემენტის Ti, O იზოტოპური შემადგენლობის დიდი ანომალიები, რაც ძალიან საინტერესო შედეგია და საჭიროებს შემდგომ კვლევას.

მიღებული შედეგები მეტად საგულისხმოა და მიუთითებს იმაზე, რომ შესაძლოა სამყაროში არსებული ორი სახის ნივთიერების (ორი “რეზერვუარი”) ჰომოგენიზაცია მოხდა 1 მიკროგრამზე ბევრად უფრო დაბალ დონეზე. ამდენად, საჭიროა მეტეორიტების უფრო ფართო კლასის შესწავლა ფრაგმენტაციის უფრო დაბალ დონეზე და უფრო მეტი ექსპერიმენტული შედეგების ანალიზი.

გამოყენებული ლიტერატურა

1. გუბაძე ნუგზარი. მეტეორიტებში, ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$, ${}^{11}\text{B}$, ${}^{10}\text{B}$ ბირთვების გავრცელებისა და კოსმოსში მათი წარმოქმნის შესახებ; ფიზ. -მათ. მეცნ. კანდ. დისერტაცია – Тб. 1996. – 128 გვ.
2. Астрофизика космических лучей под редакцией В.Л. Гинсбурга, - М.; «Наука», 1984г., ст.358.
3. Alpher R.A., Herman R.C. – Rev. Mod. Phys., 1950, v. 22, p. 153.
4. Alpher R.A., Bethe H.A. and Gamow G.; The origin of chemical elements, 1948, Phys. Rev. 73, 803.
5. Burbidge E.M., Burbidge G.R., Fowler W.A., Hoyle F.; Synthesis of the elements in Stars, 1957, Rev. Mod. Phys., 29, 547.
6. Ривс Гю; теория образования Солнечной системы при «Большом взрыве» - В кн.: Протозвезды и планеты. М.; Мир, 1965, - 306 с.
7. Bethe H.A. – Ibidem, 1939, v. 55, p. 434; in: Lex Prix Nobel 1967. – Stockholm: Almquist and Wiksell Intern.
8. Hoyle F.; Mon. Not. RAS, 1956, v. 106, p.343; Astrophys. J. Suppl., 1954, v. 1, p.121.
9. Бербидж Дж.; Ядерная астрофизика; - М.: Мир, 1969, -151 с.
10. Fowler W.A. – Ibidem, 1985, v. 145, p. 441, 3rd edition; in: Lex Prix Nobel 1983. –Stockholm.
11. Hoyle F., Schwarzschild M. – Ibidem, 1955, v.2, p. 1.
12. Tollestrup A.V., Fowler W.A., Lauritsen C.C. – Ibidem, 1949, v.76, p. 428
13. Suess H.E., Urey H.C. – Rev. Mod. Phys., 1956, v. 28, p. 53.
14. მეზონია ჯემალი; ბირთვული ფიზიკა. – თბ.: თსუ გ-ბა, 2003. – 295 გვ.
15. Кнаке Р.Ф.; Минералогические сходства между межзвездной пылью и первичным веществам Солнечной системы – В кн.: Протозвезды и планеты. М.: Мир, 1982, т. 1, ст.128-151.
16. Dempster A.I.; A new method of positive ray analysis – Phys. Rev., vol. 11, p.316-325.
17. Honig R.E.; Laser induced emission of electrons, ions and positrons from metals and semiconductors. – Appl. Phys. Lett., 1963, vol. 3, p. 8.
19. Bethe H.A., Critchfield C.L. – Phys. Rev., 1938, v. 54, p. 248
20. Fowler W.A., Grenstein J.L., Hoyle F.; Nucleosynthesis in the Early Solar System, -Geophys. J., 6, 148
21. Burnett D.S., Fowler W.A. and Hoyle F.; Nucleosynthesis in the Early Solar System, Geochim. Cosmochim. Acta, 29, 1209, 1965.
22. Шрамм Д.; Сверхновые и образование Солнечной системы – Протозвезды и планеты. М.: Мир, 1982, т.2, ст. 440-457.

23. Reeves H., Fowler W.A., and Hoyle F.; Galactic Cosmic Ray origin of Li, Be and B in Stars, - Nature, 226, 727, 1970.
24. Wagoner R.V., Fowler W.A., and Hoyle F.; on the Synthesis of Elements at Very High Temperatures, - Astrophys. J., 148, 3, 1967.
25. Данн Б.; Процессы конденсации и образование космических пылинок – В кн.: Протозвезды и планеты М.: Мир, 1982, т.1, ст. 115-127.
26. Левский Л.К. и др.; - Геохимия, №2, ст. 212-220, 1972.
27. Murthy S.V., Shukla P.N., Goel P.S.; Lithium in stone meteorites and stone irons, - Meteoritics, v.18, n.2, p.117-123, 1983.
28. D.Krankovsky and O.Muller; Isotopic composition of Li in meteoritic matter. – Geochim et cosmochim. acta, v.51, 9.1833-1842, 1987.
29. M.Sh.Kaviladze, N.V.Gubadze; Determination of Li and B isotopic composition in the microvolumes of meteorites by a highly sensitive, precise method; International Journal of Mass Spectrometry and Ion Processes 161 (1997), p.87-89
30. M.Sh.Kaviladze, N.V.Gubadze, I.M.Kaviladze, G.Natsvlshvili, L.B.Tsagurishvili and K.I.Khabuliani.;The Element composition of the Meteorites found in Georgia, Georgian Engineering news, 2006, No.1, p.230-231.
31. M.Sh.Kaviladze, N.V.Gubadze, I.M.Kaviladze, G.Natsvlshvili, L.B.Tsagurishvili and K.I.Khabuliani.;The Element composition of the Meteorites found in Georgia; Georgian Engineering news, 2006, N1, p.230-231.
32. Sandler D.G., Koonin S.E., Fowler W.A. – Astrophys. J., 1982, v.259, p.908
33. Niederer F.R., Papanastassiou D.A., Wasserburg G.J. – Astrophys. J. Lett., 1979, v.228, p.L93
34. Huck A., Klotz., Knipper A., Mieke C., Richard-Serre C., Walter G., - Preprint CERN 81-09 Geneva, 1981, p.378.
35. P.Hoppe, L.R.Nittler, S.Mostefaoui, C.M.O'D.Alexander and K. K. Marhas; A NANOSIMS STUDY OF TITANIUM-ISOTOPIC COMPOSITIONS OF PRESOLAR CORUNDUM GRAINS; Lunar and Planetary Science XXXIV, 2003.
36. A. V. Voinov, D.G.Serov, Yu.P.Popov, N.A.Gundorin, A.P.Kobzev, and S.S.Parzhitski; Measurements of the Partial Cross Section for the Reaction $^{48}\text{Ti}(n, \gamma)^{49}\text{Ti}$ and Estimation of the Radiative Strength Functions for E_1 and M_1 Transitions; Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Moscow oblast, 141980 Russia, Received March 22, 2002.